

TEKNILLINEN KORKEAKOULU  
Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Jukka Tapio Venermo

## **Johan Jakob Nervanderin tangenttibussolin rekonstruointi ja analysointi**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 1.3.2007

Työn valvoja

---

Akatemiaprofessori Ari Sihvola

Työn ohjaaja

---

Akatemiaprofessori Ari Sihvola

<b>Tekijä:</b>	Jukka Venermo	
<b>Työn nimi:</b>	Johan Jakob Nervanderin tangenttibussolin rekonstruointi ja analysointi	
<b>Päivämäärä:</b>	1.3.2007	<b>Sivumäärä:</b> 67
<b>Osasto:</b>	Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto	
<b>Professuuri:</b>	Sähkömagnetiikka	
<b>Työn valvoja:</b>	Akatemiaprofessori Ari Sihvola	
<b>Työn ohjaaja:</b>	Akatemiaprofessori Ari Sihvola	
<b>Tiivistelmäteksti:</b>		
<p>Työn tarkoituksena oli rakentaa rekonstruktio Johan Jakob Nervanderin 1834 kehittämästä galvanometristä, tangenttibussolista, ja varmentaa mittauksin, että rakennettu laite toimii oletetulla tavalla. Tangenttibussolin toiminta perustuu ns. tangenttilakiin, eli laitteessa olevan magneettineulan kiertokulman tangentti on suoraan verrannollinen laitteeseen syötettyyn virtaan. Työ jakaantui neljään osaan: rakentamiseen, numeeriseen analyysiin, mittauksiin sekä historiatutkimukseen.</p> <p>Historiaosiossa selvitetään lyhyesti tärkeimpiä sähkötekniikan kehitykseen liittyviä tapahtumia ja henkilöitä 1800-luvun alkupuolella, käydään läpi Nervanderin henkilöhistoriaa sekä tutustutaan Nervanderin alkuperäiseen tangenttibussoliin. Nervander on Suomen tieteen- sekä kulttuurihistorian merkittävimpiä henkilöitä, ja hänen tangenttibussolinsa oli aikansa tarkimpia galvanometreja.</p> <p>Rakennusosassa selvitetään työmenetelmiä, materiaalivalintoja sekä ongelmakohtia. Tangenttibussolissa ei voi käyttää magneettisia materiaaleja magneettineulaa lukuunottamatta.</p> <p>Numeerisella analyysillä selvitettiin kuinka hyvin tangenttilaki toteutuu, ja huomattiin että virhe tangenttilakiin nähden riippuu laitteessa käytettävän magneettineulan pituudesta. Pitkällä neulalla virhettä syntyy enemmän kuin lyhyellä neulalla.</p> <p>Mittaukset osoittivat laitteen toimivan oikein, mutta paljastivat myös laitteen heikkouksia. Esimerkiksi magneettineulan värähtely tekee mittauksista hidasta.</p>		
<b>Avainsanat:</b>		
Nervander, tangenttibussoli, galvanometri, multiplikaattori, tangenttilaki		

<b>Author:</b>	Jukka Venermo
<b>Name of the Thesis:</b>	The Reconstruction and Analysis of Johan Jakob Nervander's Tangentbussol
<b>Date:</b>	March 1, 2007 <b>Number of pages:</b> 67
<b>Department:</b>	Department of Electrical and Communications Engineering
<b>Professorship:</b>	Electromagnetics
<b>Supervisor:</b>	Academy Professor Ari Sihvola
<b>Instructor:</b>	Academy Professor Ari Sihvola
<p><b>Abstract:</b></p> <p>The goal of this thesis was to build a reconstruction of Johan Jacob Nervander's galvanometer, <i>tangentbussol</i>, that he developed in 1834, and to verify by measurements that the behaviour of the apparatus is as expected. The operation of the galvanometer is based on the tangent law, meaning that the tangent of the angle of rotation of a magnetic needle inside the apparatus is proportional to the current fed to the apparatus. The work is divided into four parts: building, numerical analysis, measurements and historical study.</p> <p>The historical part focuses on some of the most important events and characters involved in the development of electrical engineering in the beginning of 19<sup>th</sup> century. It also deals with Nervander in person and his original galvanometer. Nervander is one of the most remarkable figures in the history of science and culture in Finland. His apparatus was one of the most accurate galvanometers in his times.</p> <p>The building section presents the methods, materials and problems involved in the process. It is known that no magnetic materials can be used, except for the magnetic needle.</p> <p>The fulfillment of the tangent law was studied using numerical analysis. A note was made that the error respect to the tangent law depends on the length of the magnetic needle. The longer the needle, the greater the error.</p> <p>The measurements showed that the apparatus is working as expected, but they also exposed some weaknesses. For example, vibration of the magnetic needle makes measuring very slow.</p>	
<p><b>Keywords:</b></p> <p>Nervander, tangentbussol, galvanometer, multiplier, tangent law</p>	

## Alkusanat

Kun kesällä 2005 olivat opintoni siinä vaiheessa, että oli aika aloittaa diplomityön tekeminen, ehdotti akatemiaprofessori Ari Sihvola diplomityön aiheeksi Nervanderin tangenttibussolia. Aihe osoittautui erittäin mielenkiintoiseksi ja antoi mahdollisuuden ainutlaatuiseen työhön.

Sain kunnian osallistua Helsingin yliopistomuseossa Arppeanumissa järjestetyn J.J. Nervander – runoilija ja tiedemies -näyttelyn järjestelyyn syksyllä 2006. Tässä yhteydessä sain huomattavasti syvemmän käsityksen Nervanderin henkilöhistoriasta. Tästä kiitokset kuuluvat museojohtaja Kati Heinämiehelle, Ilmatieteen laitoksen tutkimusjohtaja Heikki Nevanlinnalle, emeritusprofessori Peter Holmbergille sekä Ari Sihvolalle.

Haluaisin kiittää Ari Sihvolaa työn ohjauksesta ja kannustuksesta. Tangenttibussolin rakentamisessa sain suuresti apua ja neuvoja TKK:n Radiolaboration työpajan mekaanikoilta Eino Kahralta sekä Lauri Laaksolta. Emeritusprofessori Ismo Lindellin sähkötekniikan historiaa käsittelevät luennot auttoivat ymmärtämään Nervanderin työn merkitystä 1800-luvun alkupuoliskolla.

Kiitokset kuuluvat myös Sähkömagneetiikan laboratorion koko henkilökunnalle. Erityisesti Henrik Kettusen apu on ollut korvaamatonta koko projektin aikana. Tietoteknisissä ongelmissa apua antoivat Sami Ilvonen, Henrik Wallén sekä Jari Hänninen.

Lopuksi haluaisin lausua kiitokseni äidilleni Anna-Liisalle, sukulaisilleni ja ystäväilleni tuesta opintojeni aikana.

Espoossa 1.3.2007

---

Jukka Venermo



# Sisältö

<b>1 Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2 Sähkötekniikan historiaa</b>	<b>3</b>
2.1 Sähkön ja magnetismin alkuvaiheita . . . . .	3
2.2 Sähkötekniikan kehityksen vaiheita 1800-luvulla . . . . .	4
<b>3 Johan Jakob Nervander</b>	<b>7</b>
<b>4 Nervanderin tangenttibussoli vuodelta 1834</b>	<b>12</b>
4.1 Tangenttilaki . . . . .	12
4.2 Nervanderin tangenttibussolin rakenne . . . . .	13
4.3 Nervanderin tangenttibussolin toiminta . . . . .	16
4.4 Nervanderin suorittamat mittaukset . . . . .	18
4.5 Yhteenvedo Nervanderin tangenttibussolista . . . . .	20
<b>5 Tangenttibussolin rekonstruktio</b>	<b>23</b>
5.1 Rakentaminen . . . . .	23
5.1.1 Materiaalit . . . . .	23
5.1.2 Jalusta . . . . .	24
5.1.3 Sylinterikela . . . . .	24
5.1.4 Magneettineula sekä osoitin . . . . .	25
5.1.5 Mitta-asteikot . . . . .	25
5.1.6 Rakenteelliset erot Nervanderin tangenttibussoliin . . .	25
5.2 Tangenttibussolin analyysi . . . . .	27
5.2.1 Sylinterikelan magneettikenttä . . . . .	28
5.2.2 Magneettineulan kiertyminen . . . . .	30
5.2.3 Numeeriset tulokset . . . . .	33
5.3 Mittauksen tangenttibussolilla . . . . .	38
5.3.1 Mittausjärjestely . . . . .	38
5.3.2 Mittaustulokset . . . . .	39
<b>6 Galvanometrien kehitys</b>	<b>42</b>
6.1 Tangenttigalvanometrien kvantitatiivinen vertailu . . . . .	43
6.2 Nervanderin tangenttibussolin jatkokehitys . . . . .	46
<b>7 Yhteenvedo</b>	<b>48</b>

<b>A</b>	<b>MATLAB-ohjelmien koodit</b>	<b>51</b>
A.1	Virtalangan magneettikenttä . . . . .	51
A.2	Virtalanka . . . . .	52
A.3	Magneettineulan poikkeutuskulma . . . . .	54
<b>B</b>	<b>Kenttäjakaumakuvia</b>	<b>56</b>
<b>C</b>	<b>Kuvia tangenttibussolin rekonstruoinnista</b>	<b>61</b>
	<b>Viitteet</b>	<b>66</b>

## Symbolit ja lyhenteet

<b>a, A</b>	vektori
<b>H</b>	magneettikentän voimakkuus
<i>H</i>	magneettikentän voimakkuuden itseisarvo
<b>B</b>	magneettivuon tiheys
<b>u</b>	yksikkövektori
<b>r</b>	paikkavektori
<i>I</i>	sähkövirta
<i>U</i>	jännite
<i>R</i>	resistanssi
$\alpha$	poikkeutuskulma l. poikkeama Maan magneettikentän määräämästä tasapainoasemasta
<i>d</i>	sylinterikelan pohjan halkaisija
<i>h</i>	sylinterikelan vaipan korkeus
$\vartheta$	Maan magneettikentän inkliinaatiokulma
<b>p<sub>m</sub></b>	magneettinen dipolimomentti
<i>W<sub>m</sub></i>	magneettinen potentiaalienergia
<i>L</i>	magneettineulan pituus
<i>f</i>	kelavakio
$(x, y, z)$	karteesisen koordinaatiston paikkakoordinaatit
$(\rho, \varphi, z)$	sylinterikoordinaatiston paikkakoordinaatit
$(r, \theta, \varphi)$	pallokoordinaatiston paikkakoordinaatit
NdFeB	neodyymi–rauta–boori, eräs supermagneeteissa käytetty seos (Nd <sub>14</sub> Fe <sub>2</sub> B)

## 1 Johdanto

Tämän diplomityön tarkoituksena on valottaa sähkötekniikan kehitystä 1800-luvun alkupuolella suomalaisesta näkökulmasta. Ørstedin kokeiden (1820) innoittamana suomalainen Johan Jakob Nervander omistautui sähkömagnetismin tutkimiseen. Eräs hänen saavutuksistaan oli uudenlaisen mittalaitteen, *tangenttibussolin* kehittäminen. Tangenttibussoli on eräänlainen galvanometri, jonka toiminta perustuu ns. tangenttilakiin. Laitteella kyettiin mittamaan sähkövirtaa sen magneettivaikutuksen avulla. Galvanometrit olivat sähkötekniikan kehityksen kannalta erittäin tärkeitä laitteita. Nervanderin mittalaite oli tarkimpia aikansa galvanometrejä. Tämän diplomityön pääpaino on juuri tangenttibussolissa.

Teknillisen korkeakoulun Sähkömagneetiikan laboratoriossa on varsin paljon kiinnostusta sähkötekniikan ja etenkin sähkömagnetismin historiaan. Kun vuonna 2005 tuli Nervanderin syntymästä kuluneeksi 200 vuotta, alkoi kiinnostus Nervanderin saavutuksia kohtaan todella herätä. Nervander julkaisi tutkielman kehittämästään laitteestaan 1834 Ranskan tiedeakatemian annaaleissa. Tutkielman pohjalta rakennettiin rekonstruktio Nervanderin tangenttibussolista. Tämän oli tarkoitus olla kunnianosoitus Nervanderin saavutuksille sekä historiallinen tutkimus 1800-luvun alkupuolen sähkömagnetismin tutkimuksesta Suomessa. Rekontruoidulla tangenttibussolilla tehtiin mittauksia, ja sen toimintaa simuloitiin numeerisilla laskuilla. Tarkoituksena oli selvittää, kuinka merkittävän keksinnön Nervander oli saanut aikaiseksi. Vaikka nykyään virtaa mitataan kehittyneemmin menetelmin, on sähkövirran magneettivaikutus nykyäänkin hyvin merkittävä asia, jonka havainnollistamisessa tangenttibussoli on oiva laite.

Ensiksi tehdään lyhyt katsaus sähkötekniikan historiaan. Tarkoituksena on esittää muutamia merkittävimpiä tapahtumia sekä henkilöitä, jotka omalta osaltaan mahdollistivat Nervanderin tarttua sähkömagnetismin tutkimukseen ja kehittää tangenttibussoli.

Seuraavaksi on tarkoitus valottaa hieman Nervanderin henkilöhistoriaa. Nervander oli eräs Suomen kulttuurihistorian merkittävimpiä hahmoja 1800-luvulla ja hänen lahjakkuutensa oli erittäin laaja-alaista. Tässä keskitytään lähinnä Nervanderiin tiedemiehenä ja sähkömagnetikkona. Tämän jälkeen tutustutaan tarkemmin Nervanderin alkuperäiseen tangenttibussolin rakenteeseen, toimintaperiaatteeseen sekä Nervanderin suorittamiin mittauksiin.

Historiallisen osuuden jälkeen seuraa selvitys tangenttibussolin rekonstruoinnista, analyysistä sekä mittauksista. Numeerisen analyysin sekä mittausten perusteella saatiin käsitys laitteen eduista sekä haitoista.

Lopuksi esitetään tangenttibussolin sekä yleensä galvanometrien jatkokehitystä, verrataan erilaisten tangenttikalvanometrien ominaisuuksia sekä esitetään mielteitä Nervanderin tangenttibussolista, rekonstruidusta tangenttibussolista sekä arvioidaan työn tavoitteiden toteutumista. Lisäksi pohditaan mitä annettavaa tangenttibussolilla voisi olla 2000-luvulla.

Liitteissä esitetään työn aikana syntyneiden tietokoneohjelmien koodeja, magneettikenttien visualisointeja sekä kuvia rekonstruoidusta tangenttibussolista.

## 2 Sähkötekniikan historiaa

Nyky-yhteiskunta on rakennettu sähkön sekä sen sovellusten varaan. Nykyaikana itsestäänselvyytenä pidettävät matkapuhelimet, internet sekä digiteknikka kehittyvät kovaa vauhtia. Lankapuhelimia, analogisia televisiovas-taanottimia ja korvalappustereoida pidetään jo vanhanaikaisena tekniikkana. Tulee kuitenkin muistaa, että tulitikkuaikin kokoiset mp3-soittimet, älypuhelimet tai ohjelmistoradiot eivät synny itsestään. Näiden kehityksen kannalta aiemmat, »vanhanaikaiset», teknologiat ovat merkittävässä asemassa. Lähes kaikkien nykykodin sähkölaitteiden kehityskaaren alku löytyy 1800-luvun suurten tiedemiesten tekemistä havainnoista. Galvanometrit edustivat aikansa huipputeknologiaa. Nämä tekivät sähkövirran voimakkuuden mittaamisen mahdolliseksi, tämä taas mahdollisti virtapiiriä kuvaavien suureiden selkiytymisen ja sähkötekniikan käsitteistön vakiintumisen. Uusien havaintojen sekä ideoiden karttuessa kehitys johti sähkövaloon, puhelimeen, elektroniikkaan, tietokoneisiin ja lopulta nykypäivän uusimpiin hienouksiin. Historian tuntemus laajentaa näkemystä sekä antaa mahdollisuuden ymmärtää ja arvostaa nykyajan saavutuksia.

### 2.1 Sähkön ja magnetismin alkuvaiheita

Sekä sähköllä että magnetismilla on pitkä historia [1, 2, 3]. Sähköä tarkoittava sana monissa kielissä onkin johdettu kreikan kielen meripihkaa tarkoittavasta sanasta *ἤλεκτρον* (elektron), sillä meripihkalle havaittiin syntyvän kyky vetää puoleensa kevyitä kappaleita, kun sitä hierottiin. Tämän meripihkan erikoisen ominaisuuden havaitsi jo filosofi Thales (624–547 eaa). Keskiaikaan mennessä samankaltaisiksi havaittiin myös turmaliini, rubiini sekä gagaatti. Sähkön tutkimuksesta kiinnostuttiin toden teolla vasta 1600-luvulla, kun William Gilbert (1544–1603) teoksessaan »De Magnete»<sup>1</sup> (1600) kertoi systemaattisista kokeistaan, joilla hän osoitti, että hieromalla saatava sähköinen voima ei ollutkaan vain pienen joukon ainutlaatuinen ominaisuus, vaan vastaanvanlaisiin aineisiin tuli lukea mm. lasi, rikki, sinettilakka sekä monet jalokivet. Gilbert hyökkäsi voimakkaasti pelkästään filosofiseen pohdiskeluun perustuvia käsityksiä vastaan ja korosti kokeiden sekä havaintojen merkitystä. Yleisön tietoisuuteen sähkö tuli 1700-luvulla, kun Stephen Gray (1670–1736) järjesti popularisoituja esitelmiä sähkökokeista. 1700-luvun sähkötutkimusta leimaakin käsitys, että sähköllä oli enemmän hupiarvoa kuin todellista tieteellistä merkitystä. Sähköön liittyvä mystiikka kuitenkin kiin-

---

<sup>1</sup>Englanninkielinen käännös vuodelta 1900 saatavilla sähköisesti [4].

nosti monia tutkijoita, ja useat tutkijat tekivätkin sähkökokeita muiden tutkimustensa ohessa. Tällöin tehtiin paljon sähkötekniikan kehityksen kannalta tärkeitä havaintoja, mutta käytännön sovellutukset jäivät vähiin. Merkittävimpiä oli Benjamin Franklinin (1706–1790) keksimä ukkosenjohdatin, joka säästikin useita ihmishenkiä sekä merkittävän määrän omaisuutta.

Magnetismia pidettiin sähköä merkittävämpänä, sillä magnetismi oli ilmiönä voimakkaampi sekä magnetismilla oli konkreettinen ja erittäin hyödyllinen sovellutus: kompassi, jonka kiinalaiset olivat ilmeisesti keksineet jo ensimmäisellä vuosisadalla. Kompassin merkitys varsinkin merenkululle on valtava, ja kun ajatus maapallosta suurena magneettina alkoi saada kannatusta 1700-luvulla, pidettiin magnetismin tutkimusta niin tärkeänä, että 1800-luvun alussa maailmalle alkoi syntyä magneettisia mittausasemia, joissa Maan magneettisia muutoksia mitattiin samanaikaisesti. Helsinkiinkin saatiin oma magneettinen observatorio 1841.

## 2.2 Sähkötekniikan kehityksen vaiheita 1800-luvulla

1800-luvun alussa myös sähkön tutkimus sai tuulta purjeisiinsa, kun Alessandro Volta (1745–1829) keksi jatkuvan sähkövaikutuksen lähteen: Voltan patsaan eli pariston. Keksintö oli mullistava. Uudentyyppisen lähteen ominaisuudet toivat tosin uusia ulottuvuuksia sähkötutkimuksen käsitteistöön, kun uuden laitteen antamalla jatkuvalla sähköllä *galvanismilla* oli uudenlaisia ominaisuuksia. Ruvettiin puhumaan sähkön *intensiteetistä* sekä *kvantiteetistä*. Intensiteettisähköllä oli suuri sähköinen voimakkuus, joka näkyi sen kykyinä antaa tuntuvia sähköiskuja ja lyödä näyttäviä kipinöitä, kun taas kvantiteettisähkön ominaisuuksiin kuului suuri sähkön määrä, joka lämmitti johtimia sekä sai aikaan kemiallisia reaktioita. Kytkemällä paristoja sarjaan saatiin sähkönsä intensiteettiä kasvatettua, kun taas kytkemällä rinnakkain kasvoi sähkönsä kvantiteetti. Perinteisillä sähköstaattisilla generaattoreilla saatiin aikaan vain intensiteettisähköä. Nykykäsittein intensiteettisähkö viittaa korkeaan jännitteeseen sekä suureen resistanssitason ja kvantiteettisähkö suureen virtaan sekä pieneen resistanssitason.



Kuva 1: A. G. Volta

Sähkö ja magnetismia pidettiin erillisinä ilmiöinä aina vuoteen 1820 saakka,

kunnes tanskalainen Hans Christian Ørsted (1777–1851) havaitsi galvanismin sähköisen konfliktin<sup>2</sup> vaikutuksen magneettineulaan, eli sähkövirran magneettivaikutuksen, ja nopeasti Ørsted sai selvitettyä magneettisen vaikutuksen perusluonteen: magneettinen voima vaikuttaa johdinlankaa ympäri kiertäen. Vielä samana vuonna André Marie Ampère (1775–1836) muotoili sähkönsä sekä magneettivaikutuksen määräävät matemaattiset perusyhtälöt, loi käsitteet virrasta ja jännitteestä sekä otti käyttöön sanat *sähködynamiikka*, *sähkömagnetismi* sekä aikaisempaa sähköoppia kuvaavan sanan *sähköstaattikka*. Virran ja jännitteen käsitteet eivät täysin korvanneet vanhoja käsitteitä, vaan useat käsitteet elivät iloisesti yhdessä. Lohtua lopulta toi Georg Simon Ohm (1789–1854), kun hän selvitti jännitteen, virran sekä resistanssin keskinäiset suhteet sähköpiirissä 1826, mutta hänen työnsä alkoi saada todellista hyväksyntää vasta 1840-luvulla. Ohm teki merkittävät, mutta kuitenkin varsin yksinkertaiset havaintonsa melko myöhään, 26 vuotta sähköparin keksimisen jälkeen. Suurimpia syitä tähän oli stabiilin pariston puute, sillä alkuperäisten Voltan paristojen sähkömotorinen voima heikkeni käytössä, johtuen kaasun muodostumisesta elektrodien pinnassa. Näin ollen mittausten keksiminen oli epäluotettavaa, eikä jo kerran havaittuja ilmiöitä aina pystytty toistamaan. 1821 Johann Seebeck (1770–1831) keski stabiilin lämpösähköparin. Toinen ongelma liittyi mittaustekniikkaan: kuinka mitata sähkönsä kvantiteettia eli virtaa? Sähkönsä intensiteettia, eli jännitettä pystyttiin mittaamaan jo aiemmin elektrometreillä, jotka perustuivat varausten välisiin voima-vaikutuksiin. Syitä Ohmin työn myöhäiselle hyväksymiselle oli ongelman matemaattinen lähestymistapa, joka oli tuon ajan fyysikoiden mielestä vaikeaselkoista, johtuen heidän puutteellisista matematiikan taidoistaan.



Kuva 2: H. C. Ørsted, A. M. Ampère sekä G. S. Ohm

<sup>2</sup>Ørsted kirjoituksessaan »Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam» (1820) tarkoittanee sanalla *conflictus* sähkönsä (virran) vaikutusta, joka ei rajoitu johtimen sisälle [5].



Vasta Örstedin havainnot antoivat ensi kertaa todellisen mahdollisuuden mitata sähkön kvantiteettia eli virran voimakkuutta. Pian syntyikin kokonaan uudenlaisten mittalaitteiden, *galvanometrien*, perhe, jotka perustuivat sähkövirran magneettivaikutukseen. Galvanometreissä on magneettineula, jota poikkeutetaan tasapainoasemastaan sähkövirran aiheuttamalla magneetikentällä. Galvanometrien tutkimus- ja kehitystyöhön otti osaa myös suomalainen Johan Jakob Nervander.

### 3 Johan Jakob Nervander

Johan Jakob Nervander [6, 7, 8, 9] syntyi 23. helmikuuta 1805 Uudessakaupungissa. Hänen isänsä, apteekkari Johan Nervanderin liiketoimet sujuivat huonosti, jonka johdosta hänen piti myydä apteekkinsa ja perhe muutti Ouluun 1813. Isä kuoli kolme vuotta myöhemmin jättäen perheensä köyhyyteen. Nuori Nervander muutti Turkuun, jossa hänen enonsa, filosofian adjunkti Fredrik Bergbom otti pojan hoiviinsa. Valmistuttuaan ylioppilaaksi Turun katedraalikoulusta 15-vuotiaana Nervander kirjoittautui Turun Akatemiaan. Opintojen ohessa kotiopettajana toimiesaan hän tutustui tulevaan vaimoonsa Agatha Öhmanin. Parille syntyi kaikkiaan kahdeksan lasta, joista kolme kuoli hyvin nuorina. Pari avioitui 1827, kun heidän toinen lapsensa syntyi. Nervander suoritti filosofian kandidaatin tutkinnon 1827 ja hänet promovoitiin maisteriksi Turun Akatemian siihen asti parhain arvosanoin: 30 ääntä 33:sta. Nervander oli monilahjakkuus, ja hän olisi voinut suuntautua lähes mille tahansa tieteen alalle, mutta päätti kuitenkin valita fysiikan, ja etenkin sähkömagnetismin tutkimisen.



Kuva 3: J. J. Nervander

Turku paloi 1827, jonka jälkeen yliopisto siirtyi Helsinkiin. Helsingissä Nervander sai väitöskirjansa »In doctrinam electromagnetismi momenta» valmiiksi 1829 (väitöskirjan suomennos latinasta valmistui TKK:n emeritusprofessori Antti Niemen toimesta 2006 [10]). Väitöskirjassaan Nervander käsittelee sähkövirran magneettivaikutusta. Kokeissaan hän käytti *Schweiggerin multiplikaattoria*, galvanometriä, jonka Johann Schweigger (1779–1857) oli kehittänyt. Kuvassa 4 näkyy periaatekuva Schweiggerin multiplikaattorista<sup>3</sup>. Multiplikaattorissa oli virtalanka kierretty monikierroksiseksi silmukaksi, jolloin sen aiheuttama magneettivaikutus moninkertaistui suhteessa kierrosten lukumäärään. Silmukan keskellä oli magneettineula, joka oli ripustettu silkkilankaan, jolloin magneettineula pääsi kiertymään ja hakeutuikin

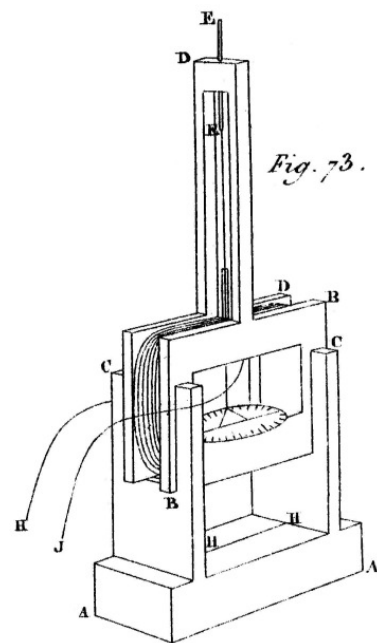
<sup>3</sup>Nervander kirjoitti käyttämänsä laitteen konstruktion olevan kirjan [11] mukainen, tosin Nervander viittasi kirjan saksankieliseen käännökseen. Kuva on Ørstedin esityksen mukainen, mutta lähes identtinen Schweiggerin multiplikaattorin kanssa.

normaalisti Maan magneettikentän määräämään suuntaan. Multiplikaattorin langat olivat asetettu magneettisen meridiaanin<sup>4</sup> suuntaan, jolloin virran aiheuttama magneettivoima poikkeutti magneettineulaa länteen tai itään riippuen virran suunnasta. Ensiksi hän teki kohteita, joissa kaksi erilaista Voltan patsasta kytkettiin multiplikaattorin muodostaman piirin lähteiksi erikseen ja mitattiin magneettineulan poikkeamakulma. Sitten molemmat patsaat kytkettiin yhdessä rinnan ja mitattiin näiden yhdessä aiheuttama poikkeama. Galvaaniset kytkennät hän sai aikaan elohopealla täytetyillä kupeilla, joihin hän upotti kytkettävien lankojen päät. Nervander teki tärkeän havainnon: jos poikkeamakulmat ovat pieniä, on rinnankytkennän aiheuttama poikkeama sama kuin yksittäisten patsaiden aiheuttamien poikkeamien summa. Tämä toteutui poikkeamakulmien ollessa pienempiä kuin kahdeksan astetta. Nervander kiinnostui tutkimaan miksi tätä suuremmilla kulmilla tämä yhteys ei enään pätenyt, ja pitkällisten geometrysten tarkasteluiden<sup>5</sup> pohjalta hän teki johtopäätöksen, että kulmien sijaan tuleekin summata niiden *tangentit*. Tämän hän osoitti myös mittauksin. Yksittäisten patsaiden aiheuttamien poikeutuskulmienkin tangenttien summa eroaa sarjaankytkennällä saatavasta (tämä johtuu Schweiggerin multiplikaattorin rakenteesta, ei mitattavasta ilmiöstä), mutta vasta paljon suuremmilla kulmilla. Nervander oli hyvin lähellä keksiä tangenttikalvanometrin perusidean, *tangenttilain*. Väitöskirjan loppuosassa hän tekee mittauksia useilla multiplikaattoreilla ja päättyy lopputulokseen, että multiplikaattoreiden  $M'$  ja  $M''$  poikkeamat pienenevät, kun piiriin on kytketty molemmat patsaat. Ja valitettavasti hänen lopulliseksi päätelmäksi jää lause:

»Yleiseksi jää siis sääntö, joka lausuu patsaiden Sähkö-Magneettisen voiman vähentyvän sillä hetkellä, jolla niiden virta pakotetaan

<sup>4</sup>Magneettinen pohjois-eteläsuunta, joka poikkeaa hieman maapallon pyörimisakselin määräämästä maantieteellisestä pohjois-eteläsuunnasta.

<sup>5</sup>Alkuperäiset kuvat, joihin Nervander väitöskirjassaan viittaa, ovat kadonneet, joten hänen tarkasteluidensa yksikäsitteinen tarkastelu jälkikäteen on mahdotonta.



Kuva 4: Schweiggerin multiplikaattori [11].

suuntaamaan yhteisen reittinsä saman johtimen kautta kulkevaksi, ja vähentyvän sitä enemmän, mitä suurempi niiden kunkin neulaa poikkeuttava voima itsenäisenä olisi.»

Hän kuittaa ilmiön patsaiden syyksi. Nykyään ilmiö on helppo osoittaa kytkennän ominaisuudeksi piirianalyysin erään perusperiaatteen, kerrostamismenetelmän, avulla.

Väitöskirjansa ansiosta Nervander nimitettiin fysiikan dosentiksi. Vuonna 1832 Nervander sai määräaikaisen fysiikan professuurin hoidettavakseen professori Gustaf Hällströmin tultua valituksi yliopiston rehtoriksi. Samana vuonna hän kirjoitti myös matemaattisen virkaväitöskirjan »De curvarum in genere tertii ordinis osculatrice», jonka jälkeen hänet nimitettiin matematiikan ja fysiikan adjunktiksi (eli apulaisprofessoriksi).

Vuonna 1831 yliopistolla tuli ensimmäistä kertaa jakoon suuri Aleksanterin matka-apuraha, suurimmillaan 2500 hopearuplaa, kahden vuoden ulkomaille opiskelua varten. Nervander oli apurahan ainoa hakija, ja hän sen saikin. Pitkä opintomatka alkoi marraskuussa 1832 Tukholmasta. Helmikuussa 1833 hän siirtyi Kööpenhaminaan, jossa hän tutustui Örstediin. Kööpenhaminasta hän matkusti Saksaan Göttingeniin, jossa hän sai seurata Wilhelm Weberin (1804–1891) sekä Carl Friedrich Gaussin (1777–1855) lennätinkokeita. Nervander tutustui myös Göttingenin tähtitieteellisen ja magneettisen observatorion toimintaan, joka oli osa Alexander von Humboldtin (1769–1859) aiemmin ehdottamaa kansainvälistä maapallon magneettisuuden tutkimusta. Göttingenistä Nervander siirtyi Pariisiin, jossa hän valmisteli uuden galvanometrinsä, joka myöhemmin tunnetaan nimellä *tangenttibussoli*. Nervander esitteli uutta keksintöään Ranskan tiedeakatemialle 1834. Laitteen rakenteen sekä sillä suoritettuja mittauksia Nervander julkaisi nimellä »Mémoire sur un Galvanomètre à châssis cylindrique par lequel on obtient immédiatement et sans calcul la mesure de l'intensité du courant électrique qui produit la déviation de l'aiguille aimantée» Gay-Lussacin ja Aragon toimittamassa aikakausisarjassa *Annales de Chimie et de Physique* [12] (Ari Sihvolan suomenos ranskankielisestä alkutekstistä on julkaistu 2005 [13]). Hän tutustui myös henkilökohtaisesti Humboldtiin, ja alkoi kiinnostua meteorologiasta tieteenä. Pariisista Nervander matkusti Italiaan, jossa hän tutustui mm. fysiikan instrumenttien valmistukseen sekä Italian taidearteisiin. Lokakuussa 1834 hän matkusti Berliiniin. Talven sekä kesän 1845 hän vietti Wienissä, missä hän valmisti parannellun version galvanometristään. Kotimatka alkoi Saksasta ja Pietarin kautta hän saapui Helsinkiin 20.1.1836. Pietarissa, johon hänen ei

alunperin pitänyt mennä lainkaan, hän tutustui mm. Moritz Hermann von Jacobiin (1801–1874) sekä Friedrich Wilhelm Lenziin (1804–1865) sekä Pietarin keisarillisen tiedeakatemian johtajaan Adolf Kupfferiin (1799–1865). Näillä henkilöillä oli erittäin suuri merkitys Nervanderin uran jatkoa ajatellen. Kupffer tahtoi, että myös Helsinkiin perustetaan magneettinen observatorio osaksi Venäjän observatorioiden ketjua. Kupffer oli jo 1830 ehdottanut Hällströmille ideaa, mutta tämä oli kieltäytynyt. Nervanderin opintomatka kesti sovitun kahden vuoden sijaan kolme vuotta ja kolme kuukautta.

Kupffer uudisti ehdotuksensa magneettisen observatorion perustamisesta Helsinkiin ja ehdotti Nervanderia sen johtajaksi. Nervanderin suostuttua Kupffer jätti asiasta esityksen yliopiston kanslerille, kruununperijä Aleksanterille, joka keisarina 1855–1881 tunnettiin nimellä Aleksanteri II. Arvovallallaan em. pietarilaiset sekä yliopiston vt. kansleri, Pietarissa asemaa pitävä Robert Rehbinder (1777–1841), saivat asialle pian myönteisen ratkaisun, vaikka yliopiston konsistori vastusti hanketta vähiin varoihin vedoten. Maaliskuun 28. päivänä 1838 Keisari Nikolai I allekirjoitti Pietarissa Helsingin magneettisen observatorion perustamiskirjan, ja observatorion johtoon Nervander määrättiin ylimääräisen professorin asemalla. Nervander lähti uudelle opintomatkalle 1837, jonka aikana Nervanderin tarkoitus oli tutustua nimenomaan magneettisten observatorioiden toimintaan. Matka kohdistui pääosin Saksaan, Göttingeniin. Nervander valitsi Gaussin ja Weberin Göttingenin uuden magneettisen observatorion tulevan Helsingin observatorion esikuvaksi. Observatoriorakennukset valmistuivat 1841 Kaisaniemeen.

Helsingissä säännölliset mittaukset alkoivat 1.7.1844 Nervanderin sekä hänen kahdentoista assistenttinsa toimesta. Magneettiset havainnot tehtiin 10 minuutin välein vuorokauden ympäri ja meteorologiset havainnot kerran tunnissa. Assistentit tekivät töitä kahden tunnin vuoroissa. Mittaaminen kävi hankalaksi, kun 1902 käynnistynyt sähköraitiotieliikenne häiritsi herkkiä mittauksia. Mittauksia tehtiin kuitenkin vuoden 1912 loppuun saakka. Tarkka yli 50 vuotta kestänyt keskeytyksetön mittaussarja on osoittautunut hyvin arvokkaaksi, eikä vastaavia ole muualta juurikaan säilynyt. Usean nimenvaihdon, muuton sekä hallinnollisen uudistuksen kautta observatoriosta on kehittynyt Ilmatieteen laitos [14].

Nervander kuoli yllättäen 15.3.1848 isorokkoon. Hänen tieteelliset sekä kulttuurilliset saavutuksena olivat huomattavat. Hän oli Societas pro Fauna et Flora Fennican, Lauantaiseuran sekä Suomen Tiedeseuran perustajajäsen,



Kuva 5: Magneettisen observatorion havaintosali 1900-luvun alussa. (kuva: Ilmatieteen laitos)

ja viimeisimmässä toimi myös puheenjohtajana 1847–1848. Hän toimi myös Pietarin Tiedeakatemian kirjeenvaihtajajäsenenä 1844 sekä Suomen Taideyhdistyksen hallituksen jäsenenä 1846–1848. Hänet palkittiin Venäjän Pyhän Vladimirin ritarikunnan 4. luokan kunniamerkillä 1843 sekä hänelle myönnettiin postuumisti puolikas aikansa merkittävimpiin kuuluvasta tiedepalkinnosta, Demidovin palkinnosta, magneettis-meteorologisten mittaustensa ansiosista. Nervander sai lopulta haluamansa fysiikan professuurin 1845 Hällströmin kuoltua. Edes Nervanderin useampi samanaikainen professuuri ei riittänyt ylläpitämään hänen elintasoaan, vaan hän eli jatkuvasti yli varojensa. Lainaa otettiin edellisten poismaksamiseksi, ja kuoltuaan Nervander jätti perheensä velkoihin. Myös Nervanderin suuri keksintö, tangenttikalvanometri, meni toisiin nimiin: Claude Servais Mathias Pouillet (1790–1868) esitetään yleensä tangenttikalvanometrin keksijänä, mutta hän julkaisi omaa galvanometriään koskevan kirjoituksen 1837 [15, 16, 17], siis kolme vuotta Nervanderia myöhemmin.

## 4 Nervanderin tangenttibussoli vuodelta 1834

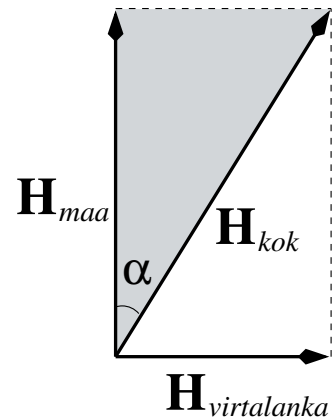
Opintomatallaan Pariisissa 1834 Nervander sai valmiiksi uuden galvanometrin, joka erosi olellisesti muista aikalaisistaan. Periaatteltaan se on tangenttigalvanometri, eli johdinlangassa kulkevan virran voimakkuus on verrannollinen osoitinneulan kiertokulman tangenttiin. Nykyään laite tunnetaan nimellä tangenttibussoli. Sana *bussoli* tulee ranskasta, ja se tarkoittaa tarkkuuskompassia. Nervander ei tietävästi itse käyttänyt tätä nimitystä laitteestaan, vaan puhui vain galvanometristä. Tämä luku tukeutuu Nervanderin ranskankielisen artikkelin [12] suomennokeeseen [13] ja kaikki lainaukset on tehty suomenkielisestä tekstistä.

### 4.1 Tangenttilaki

Tangenttigalvanometrin perusidea on hyvin yksinkertainen: Maan magneettikentässä  $\mathbf{H}_{maa}$  magneettineula (kompassineula) kääntyy magneettisen meridiaanin suuntaiseksi. Virtajohtimessa kulkevalla virralla voidaan neulaa poikkeuttaa. Asettamalla virtalanka siten, että sen aiheuttama magneettikenttä  $\mathbf{H}_{virtalanka}$  kääntäisi neulan itään tai länteen, eli kohtisuoraan magneettiseen meridiaaniin nähden. Lopulta magneettineula asettuu näiden kahden magneettikentän resultantin  $\mathbf{H}_{kok}$  suuntaiseksi. Tällöin kiertokulman  $\alpha$  tangentti on verrannollinen kenttien itseisarvojen osamäärään, eli

$$\tan \alpha = \frac{|\mathbf{H}_{virtalanka}|}{|\mathbf{H}_{maa}|}. \quad (1)$$

Tämän yhteyden voi lukea kuvan 6 kolmiosta. Koska virtalangan aiheuttama magneettikenttä on suoraan verrannollinen johtimessa kulkevaan virtaan  $I$  [18], on myös kiertokulman tangentti tähän verrannollinen.



Kuva 6: Tangenttilaki: magneettineula kääntyy kokonaiskentän suuntaan. Poikkeutuskulman  $\alpha$  tangentti on verrannollinen kokonaiskentän komponenttien suhteeseen.

Edellä on tehty oletus, että magneettikentät ovat homogeenisia neulan alueella. Todellisuudessa tilanne ei koskaan ole tämä, ja epähomogeenisuus aiheuttaa virhettä laitteen toiminnassa. Tilannetta on tarkasteltu lähemmin

luvussa 5.2.

## 4.2 Nervanderin tangenttibussolin rakenne

Nervander kuvasi alkuperäisen laitteensa rakenteen varsin yksityiskohtaisesti kirjoituksessaan. Kuvassa 7 on kaavakuva alkuperäisestä tangenttibussolista. Laitteen sydän on magneettineula  $oo$ , joka on ympyräsynterinin muotoiselle kehikolle käämityn kelan (jatkossa *synterikelä*)  $G^6$  keskellä. Magneettineula on kiinteästi kiinni osoitinneulassa  $KK'$  kannatusruuvien  $n$  avulla. Kannatusruuvi neuloineen on ripustettu silkkilangalla  $E$  lasiputken  $D$  yläpäässä olevaan ripustimeen  $c$ , joka kostuu koukusta sekä säätöruuvista, jolla voi säädellä neulojen korkeutta. Silkkilangan varassa neulat pääsevät kiertymään kitkatta<sup>7</sup>, jolloin magneettineula asettuu magneettikentän vaakakomponentin määräämään suuntaan<sup>8</sup>. Synterikelan ontto kehikko on valmistettu puusta tai epämagneettisesta metallista (Nervander käytti puista kehikkoa, jonka pohjan halkaisija oli n. 70 mm, korkeus n. 23 mm ja näiden suhde  $d/h \approx 3,0$ ). Kehikon päälle on käämitty kahdesta erillisestä eristetyistä kuparilangasta toistensa ympärille kierretty kuparinen johdinlankapari<sup>9</sup> (vrt. kierretty parikaapeli) siten, että pohjassa ja katossa eri kierrosten langat ovat mahdollisimman samansuuntaiset sekä mahdollisimman tasaisin välein (ks. kuva 8). Langan tulisi kattaa koko synterikelan pinta, mutta Nervanderin alkuperäislaitteessa johtimet kattoivat ainoastaan n.  $45^\circ$  keskilinjaa molemmiin puolin. Synterikelä kiinnittyy kehtomaiseen kiertoniveleen  $k$ , jota voidaan kiertää vapaasti akselinsa ympäri vivulla  $g$ . Jalustan  $AA$  alareunassa on mitta-asteikko, josta voi lukea synterikelan asennon. Kuvan perusteella arvioituna magneettineulan pituus on ollut n. 0,8 kertaa pohjan halkaisija eli n. 56 mm. Synterikelan ja osoittimen välissä on lasilevy  $h$ . Levyssä on kaiverrettuna mitta-asteikko, josta voi lukea osoittimen asennon. Lasilevyn keskellä on reikä  $M$ , jonka läpi neulojen kannatin kulkee, ja jonka avulla lasilevy voidaan keskittää oikein suhteessa synterikelan katossa olevaan reikään  $H$ . Synteri-

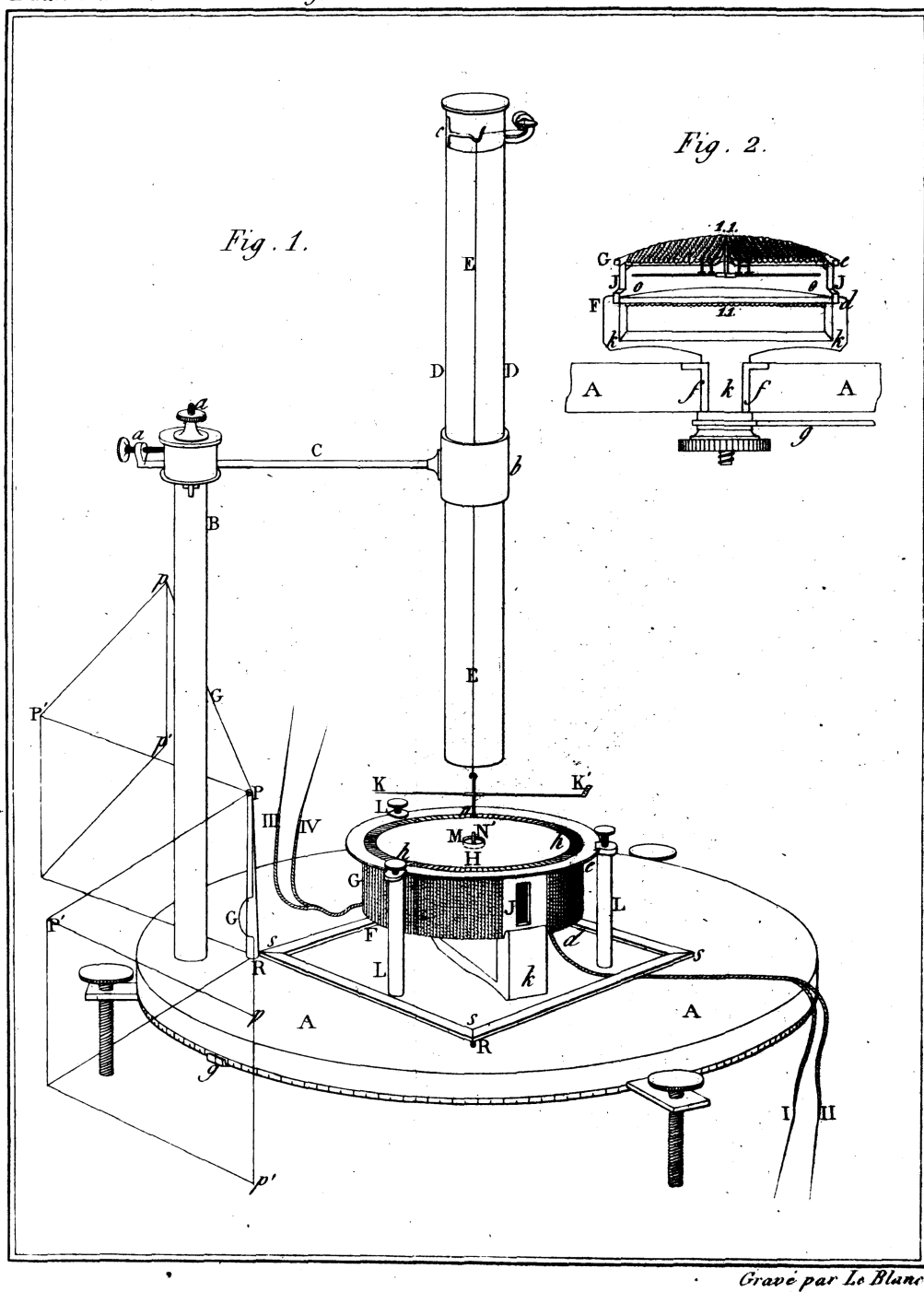
<sup>6</sup> $G$  esiintyy kahdessa eri merkityksessä kuvassa 7. Merkinnät eivät muutenkaan ole yksiselitteisiä eivätkä aina edes sopusoinnussa Nervanderin alkuperäisen tekstin kanssa.

<sup>7</sup>Silkkilangalla on myös oma kiertovoimansa, mutta sen Nervander jätti huomioimatta.

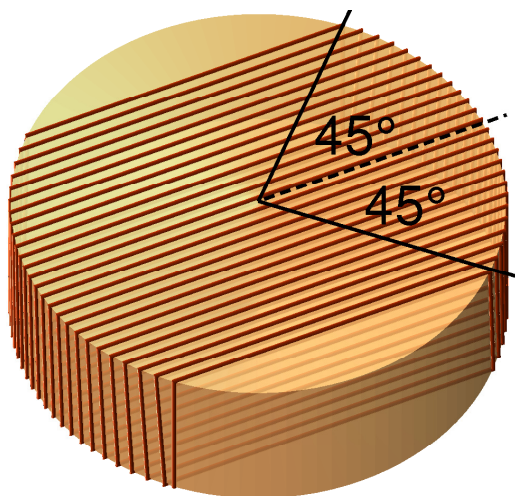
<sup>8</sup>Maan magneettikenttä ei ole maanpinnan suuntainen, vaan sillä on myös maanpinnalle kohtisuora komponentti, joten magneettineulakin pyrkii kääntymään »vinoon». Gravi-taatio pitää huolen siitä että tasapainoasemassaan neula on kuitenkin lähes maanpinnan suuntainen.

<sup>9</sup>Nervander kutsui lankojen muodostamaa käämiä multiplikaattoriksi, joka on tässä yhteydessä hieman harhaanjohtava termi, sillä tällä tavalla käämityn langan magneettikenttä ei moninkertaistu kierrosten suhteessa



*Annales de Chimie et de Phys. Tom. 55.**Pl. 1.*

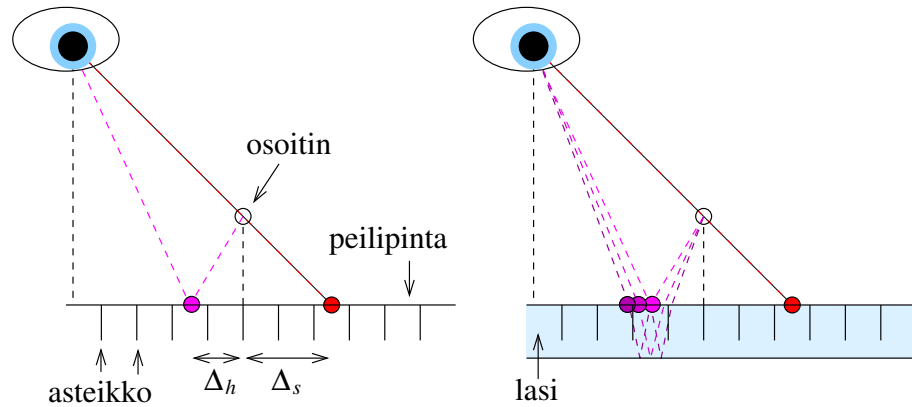
Kuva 7: Nervanderin tanganttibussolin kaavakuva [12].



Kuva 8: Periaatekuva Nervanderin sylinterikelasta.

kelan, lasilevyn sekä osoittimen ympärillä on lasihäkki  $PP_{pp}$ , jonka tarkoitus on estää ilmavirtausten vaikutus herkkään osoittimeen. Lisäksi jalustassa on kolme ruuvia, jotka toimivat jalkoina, ja joilla jalusta saadaan asetettua suoraksi.

Osoittimen päässä  $K'$  on metalliliuska, jonka on tarkoitus toimia tarkkuusmittana. Liuskan molemmin puolin on merkitty oma asteikkonsa, jota verrataan levyssä olevaan asteikkoon (vrt. esim. työntömitoissa käytetty noniusasteikko [19]). Osoittimen asento luetaan lasilevystä tulevan heijastuksen kautta. Nervander kirjoitti voivansa lukea osoittimen asennon luotettavasti viidentoista kaariminuutin eli asteen neljännesosan tarkkuudella tällä tavoin. Myöhemmistä kehitysversioistaan hän tosin poisti tarkkuusmitan sekä osoittimen lukemisen heijastuksen avulla, eli menetelmä ei liene ollutkaan aivan niin hyvä, kuin Nervander esitti alunperin. Käytännön ongelmia on varsinkin lasilevystä tulevat moninkertaiset heijastukset sekä heijastuksen himmeys, jolloin valaistusolosuhteilta vaaditaan paljon. Kuvassa 9 esitetään periaattellinen saavutettu hyöty heijastuksen kautta lukemisesta: jos osoitinta luetaan »vinosti», on heijastuksen kautta luettaessa aiheutuva lukuvirhe  $\Delta_h$  pienempi kuin suoraan luettaessa ( $\Delta_s$ ), kun heijastus tapahtuu täydellisestä peilipinnasta. Kun heijastus tulee lasilevystä, nähdään heijastuksen kautta selkeän osoittimen asemasta epämääräinen »sumuinen» kuva osoittimesta moninkertaisista heijastuksista johtuen.



Kuva 9: Asteikon lukeminen heijastuksen kautta: ideaalisesta peilipinnasta sekä äärellisestä lasilevystä.

Rakentamisessa on ollut tärkeää välttää materiaaleja, joilla olisi merkittävä magneettinen vaste, eli suuri suhteellinen permeabilisuus  $\mu_r$ , koska nämä vaikuttaisivat magneettineulan asentoon<sup>10</sup>. Metalliosat oli alkuperäisessä laitteessa tehty pääosin kuparista, myöhemmin Nervander käytti kuparin sijaan hopeaa, sillä Nervander ei onnistunut saamaan tarpeeksi puhdasta kuparia, vaan joukossa oli ollut myös hieman rautaa, joka ilmeisesti oli hieman heikentänyt laitteen suorituskkyä.

Koska alkuperäinen bussoli ei ole säilynyt, eikä siitä tiettävästi ole muita kuvia olemassa, on mahdotonta tietää kuinka tarkkaan todellinen valmistettu laite vastaa kaavakuvaa. Kaiken kaikkiaan laite lienee ollut kaunista ja laadukasta käsityötä. Nervanderin myöhemmin rakentamaa, nykypäiviin asti säilynyttä, tangenttibussolia käsitellään tarkemmin kappaleessa 6.2.

### 4.3 Nervanderin tangenttibussolin toiminta

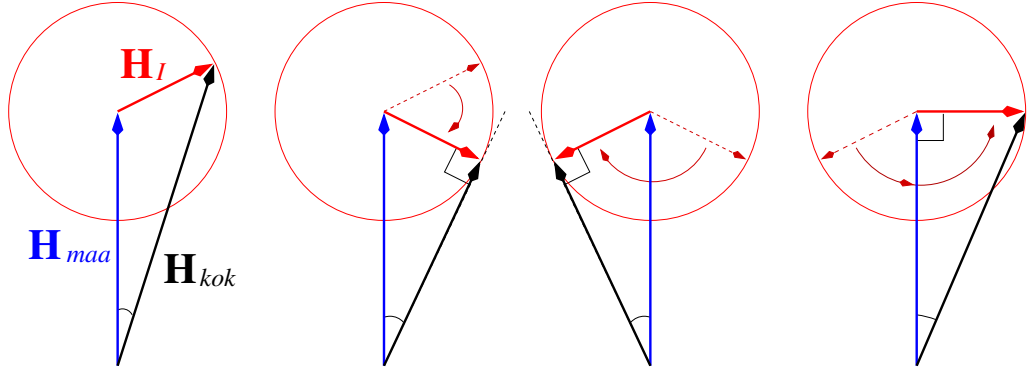
Tangenttibussolin sylinterikelan sisälle syntyy magneettikenttä, kun virtalankaan syötetään sähkövirtaa. Syntynyt magneettikenttä on varsin homogeeninen, eli suunnaltaan ja voimakkuudeltaan kaikkialla sylinterikelan sisällä samanlainen. Tämä on ollut koko tangenttibussolin kumouksellisin piirre; homogeeninen magneettikenttä mahdollistaa pitkän, herkän magneettineulan käytön. Syntyneen magneettikentän suunta on virtalangan kierrosten muodostamien »silmukoiden» läpi. Virtalangat tulee siis asettaa magneetti-

<sup>10</sup>Itse magneettineulan tulee luonnollisesti olla magneettista materiaalia

sen meridiaanin suuntaiseksi, jotta virran aiheuttama magneettikenttä olisi Maan magneettikenttää vastaan kohtisuorassa. Virtalanka koostuu kahdesta erillisestä johtimesta, jotka kytkemällä sarjaan siten, että virta kulkee sylinterin kehällä molemmissa johtimissa samaan suuntaan, saadaan sylinterikelan kierrosten lukumäärä kaksinkertaistettua siihen nähden, että virta syötettäisiin ainoastaan toiseen johtimista. Tämä kaksinkertaistaa myös virran aiheuttaman magneettikentän voimakkuuden.

Sylinterikela tulee siis asettaa asentoon, jossa virtalankojen magneettikenttä on kohtisuorassa Maan magneettikenttää vastaan. Kuvassa 10 on esitetty tähän yksinkertainen proseduuri. Ennen virran kytkemistä otetaan muistiin osoittimen asento. Kytketään virta  $I$  johtimeen, jolloin osoittimen asento muuttuu, sillä magneettineula asettuu nyt kokonaismagneettikenttävektorin (vaakakomponentin) suuntaiseksi. Kokonaismagneettikenttä  $\mathbf{H}_{kok}$  muodostuu Maan magneettikentän  $\mathbf{H}_{maa}$  sekä virran aiheuttaman magneettikentän  $\mathbf{H}_I$  vektorisummana.  $\mathbf{H}_I$  voidaan kääntää osoittamaan mihin suuntaan tahansa, jolloin sen kärki piirtää ympyrän kaarta, kun sylinterikela kierretään. Kokonaiskenttä voidaan piirtää lähteväksi  $\mathbf{H}_{maa}$ :n alkupisteestä ja päättyvän ympyrän kehälle. Lähdetään kiertämään sylinterikela, jolloin  $\mathbf{H}_I$  kiertyy mukana, kunnes magneettineulan (sekä osoittimen) poikkeama alkuasennosta on suurimmillaan. Tällöin kokonaiskenttä  $\mathbf{H}_{kok}$  on tangentiaalinen ympyrälle. Pannaan muistiin alustan mitta-asteikolta sylinterikelan asento  $\gamma'$ . Jatketaan sylinterikelan kiertamista samaan suuntaan kunnes saavutetaan toinen poikkeaman maksimi, joka on tällä kertaa vastakkaiseen suuntaan kuin edellinen. Pannaan taas muistiin sylinterikelan asento  $\gamma''$  ja lasketaan näistä merkinnöistä maksimien välinen kulmaerotus  $\gamma = |\gamma' - \gamma''|$ . Sitten kierretään sylinterikela takaisinpäin  $\gamma/2$  astetta, jonka jälkeen  $\mathbf{H}_I$  on yhdensuuntainen Maan magneettikentän kanssa. Kierretään vielä  $90^\circ$ , jolloin kentät ovat kohtisuorat. Menetelmä toimii periaatteessa aina, kun  $|\mathbf{H}_I| < |\mathbf{H}_{maa}|$ . Toinen tapa asettaa sylinterikela oikeaan asentoon on syöttää lankoihin suuri virta, jolloin virran aiheuttaman magneettikentän voimakkuus  $|\mathbf{H}_I| > |\mathbf{H}_{maa}|$ . Nyt kierretään kela kunnes saavutetaan poikkeamakulma  $0^\circ$ . Tällöin sekä Maan että sylinterikelan kentät ovat samansuuntaiset. Kierretään sylinterikela  $180^\circ$ , jolloin pitäisi saada vastaavasti osoitinneulalle  $180^\circ$  poikkeama (kentät vastakkaissuuntaiset). Kiertämällä sylinterikela tästä asennosta  $90^\circ$  jompaan kumpaan suuntaan, tulisi sen asennon olla oikea.

Nyt kun sylinterikela on asetettu siten, että sen aiheuttama magneettikenttä on kohtisuorassa Maan magneettikenttää vastaan, on laitteen toiminta tan-



Kuva 10: Proseduuri sylinterikelan asettamiselle oikeaan asentoon.

gentilain mukaista, eli osoittimen poikkeamakulman  $\alpha$  tangentti on suoraan verrannollinen virtalangassa kulkevan virran  $I$  voimakkuuteen.

$$I = k \tan \alpha \quad (2)$$

Todellista virran mittausta varten tulee vielä selvittää virran ja kiertokulman tangentin välinen verrannollisuuskertoimen  $k$ . Tätä varten tulee laitteeseen syöttää tunnettu referenssivirta  $I_{ref}$  ja mitata vastaava kulma  $\alpha'$ , joista voidaan laskea

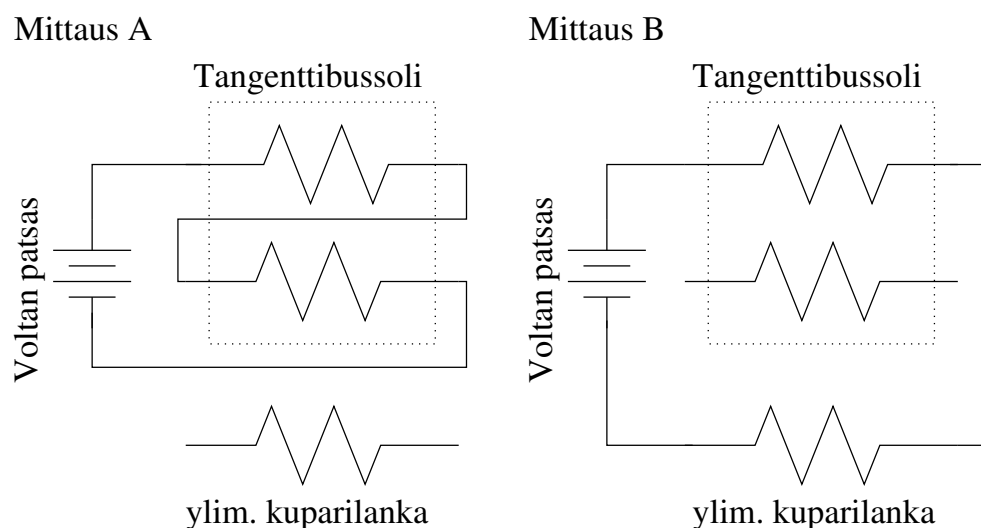
$$k = \frac{\tan \alpha'}{I_{ref}}. \quad (3)$$

Lisäksi on huomioitava, että Maan magneettikenttä on eri paikoissa erilainen. Varsinkin leveyspiiri vaikuttaa, sillä Maan magneettikenttä on kutakuinkin dipolin kenttä, ja siksi se on esimerkiksi Ranskassa merkittävästi erilainen kuin Suomessa, jossa ollaan lähempänä magneettista pohjoisnapaa. Tästä johtuen virran ja osoittimen kiertokulman välinen suhde riippuu ympäristöstä. Erilaisissa magneettisissa ympäristöissä tulee siis erikseen selvittää kerroin  $k$ .

#### 4.4 Nervanderin suorittamat mittaukset

Nervander suoritti mittauksia laitteellaan selvittääkseen kuinka hyvin laite toimii. Nervander kirjoittaa, että jokaisella galvanometrillä on tietty poikkeutuskulma, jonka yli mentäessä galvanometri ei toimi oikein. Mittauksillaan hän pyrki hakemaan juuri tuon kulman rakentamalleen galvanometrille.

Nervanderin mittausjärjestely (kuva 11) on kaksivaiheinen: mittaus A ja mittaus B (sekä mittaukset A' ja B'). Mittausvälineinä hänellä on Voltan patsas, tangenttibussoli, ylimääräinen kuparilanka sekä elohopeakuppeja, joilla hän saa kontaktit aikaiseksi. Ylimääräinen kuparilanka on samanlainen kuin mitä hän on käyttänyt sylinterikelassa, eli sen resistanssi on yhtä suuri. Mittauksessa A hän kytkee Voltan patsaan lähteeksi piirille, joka muodostuu sylinterikelan johdinlankojen sarjaankytkennästä. Mittauksessa B hän korvaa toisen sylinterikelan johdinlangoista ylimääräisellä kuparilangalla. Mittaukset A' ja B' ovat kuten A ja B, mutta Voltan patsaan navat on kytketty toisin päin, jolloin mitatun poikkeaman tulisi olla yhtä suuri, mutta vastakkaissuuntainen.



Kuva 11: Periaatekuva Nervanderin mittausjärjestelystä.

Ylimääräisen virtalangan ansiosta kaikissa mittauksissa virtalangan resistanssi pysyy samana, jolloin myös virta pysyy samana. Mittauksessa A virtalangan aiheuttama magneettikenttä sylinterikelan sisällä on kaksinkertainen mittaukseen B nähden, jolloin A:ssa mitatun poikkeamakulman tangentin tulisi olla kaksinkertainen B:ssä mitatun kulman tangenttiin nähden. Nervander toisti kokeen usealla eri Voltan patsaalla ja kokosi mitaustuloksista taulukon (ks. kuva 12). Nervander kirjoittaa johtopäätöksensä:

»Tekemäni kokeet todistavat selvästi, että käyttämälläni galvanometrille mainittu laki on täydellisen yhtäpitävä havaintojen kanssa siihen asti, kunnes poikkeamat ylittävät noin 30°:n lukeman

huolimatta siitä, että multiplikaattorilangat peittivät sylinteristä vain 46° molemmin puolin pohjan keskihalkaisijalta».

Nervander kirjoitti, että suuremmillakin kulmilla voisi mitata tekemällä mitauksiin korjauksen. Tätä varten tulisi koota mittava taulukko vertailuaineistoa, jotta saisi kartoitettua poikkeutuskulman virheen käyttäytymisen.

*Expérience première.*

$$\begin{array}{r|l|l}
 \begin{array}{r} 221^{\circ} 40' = B \\ 195 \quad 45 \quad 0 \\ \hline 25 \quad 55 \end{array} & \begin{array}{r} 238^{\circ} 15' = A \\ 195 \quad 45 \quad 0 \\ \hline 42 \quad 30 \end{array} & \begin{array}{r} 195^{\circ} 45' = 0 \\ 153^{\circ} 15' ? (20') = A' \\ \hline 42 \quad 30 \quad (25'?) \end{array} \\
 2 \text{ Tg } 26^{\circ} = \text{Tg } 44^{\circ} 17' & & \\
 \text{Diff.} = + 1 \quad 47 & & 
 \end{array}$$

*Expérience seconde.*

$$\begin{array}{r|l|l}
 \begin{array}{r} 232^{\circ} 40' = A \\ 195 \quad 45 \quad 0 \\ \hline 36 \quad 55 \end{array} & \begin{array}{r} 195^{\circ} 45' = 0 \\ 174 \quad 30 \quad B' \\ \hline 21 \quad 15 \end{array} & \begin{array}{r} 217^{\circ} 15' = B \\ 195 \quad 45 \quad 0 \\ \hline 21 \quad 30 \end{array} \\
 2 \text{ Tg } 21^{\circ} 20' = \text{Tg } 38^{\circ} 50' & & \\
 \text{Diff.} = + 1 \quad 10 & & 
 \end{array}$$

*Expérience troisième.*

$$\begin{array}{r|l|l}
 \begin{array}{r} 195^{\circ} 45' = 0 \\ 160 \quad 45 \quad + = A' \\ \hline 35 \quad - \end{array} & \begin{array}{r} 195^{\circ} 45' = 0 \\ 175 \quad 45 \quad + = B' \\ \hline 20 \quad - \end{array} & \begin{array}{r} 215^{\circ} 45' = B \\ 195 \quad 45 \quad 0 \\ \hline 20 \quad - \end{array} \\
 2 \text{ Tg } 20^{\circ} = \text{Tg } 36^{\circ} 3' & & \\
 \text{Diff.} = + 1 \quad 3 & & 
 \end{array}$$

Kuva 12: Ote Nervanderin mittaustuloksista [12]. Kuvassa tulokset mittauksista 1–3. Kaikkiaan Nervander taulukoi 18 mittausta.

## 4.5 Yhteenveto Nervanderin tangenttibussolista

Nervanderin tangenttibussoli oli aikansa tarkimpia galvanometrejä. Sylinterinmuotoiselle kehikolle käämityn virtalangan synnyttämä magneettikenttä on melko homogeeninen verrattuna yksinkertaisten monikierroksisten silmukoiden eli multiplikaattoreiden magneettikenttään. Homogeenisessä magneettikentässä voi käyttää pitkää magneettineulaa, jolloin saavutetaan suuri herkkyys.

Tangenttibussolissa oli myös heikkouksia. Nervanderin ajatus osoittimen tarkkuusmitasta sekä osoittimen asennon lukemisesta heijastuksen kautta osoitautui jatkossa ilmeisesti huonoksi. Suuri ongelma, joka vaivasi lähes kaikkia tuon ajan galvanometrejä, mutta jota Nervander ei erityisesti maininnut, oli neulan värähtely. Kun virtalankaan kytketään virta, magneettineula asettuu uuteen suuntaansa hitaasti ja värähdellen. Lopulliseen asettumiseen voi mennä minuutteja, ja tämä teke mittaamisesta hidasta. Myös stabiilin virtalähteen saaminen on tuottanut Nervanderille päänvaivaa. Sinkistä, kuparista sekä elektrolyytistä koostuvissa paristoissa ongelmana oli vetykaasun muodostuminen kuparilevyllä. Tämä kasvatti sisäistä resistanssia jatkuvasti ja piiriin syötetty virta pieneni.

Huomionarvoisia ovat Nervanderin tekemät mittaukset. Ylimääräisen kuparilangan käyttö osoittaa, että Nervanderilla on jonkinlainen käsitys itse piirin vaikutuksesta, ja väistämättä herää ajatus onko hän tietoinen Ohmin työstä. Tarkempi tarkastelu kuitenkin paljastaa, että hänen käsityksensä sähköpiireistä ovat nykytietämyksen valossa osittain virheellisiä. Hän esimerkiksi mainitsee, että pitkällä langalla »virran voimakkuus osittain hukkaantuu», kun piirin lankoja pidennetään. Myös tangenttibussolin käytännöllisen toiminta-alueen rajoittumisen vain tietyn rajakulman alapuolelle hän selittää osittain virtalankojen johtokyvyn heikkenemisellä, kun niihin syötetään suurempia virtoja.

Valitettavasti Nervander ei esitä laitteen toimintaa kuvaavia matemaattisia kaavoja, vaikka niihin sanallisesti viittaakin. Ainoa matemaattinen kaava koko artikkelissa on

$$2 \tan b = \tan a, \quad (4)$$

missä  $b$  viittaa mittauksessa B saatavaan poikkeutuskulmaan ja  $a$  vastaavasti mittauksessa A saatavaan poikkeutuskulmaan. Nervanderilla ei ole myöskään paljoa viittauksia, joten on vaikea arvioida mitkä ideoista ja ajatuksista ovat hänen omiaan. Tälläisiä on varsinkin sylinterikela. Kuinka on päädytty keelaamaan lanka tällä tavoin sylinterin ympärille?

Nervanderilla tuntuu olevan vankka usko, että rakentamalla tangenttibussolin tarkemmin sekä käänimällä paksu virtalanka (joka ei kyllästyisi virrasta) siten, että se peittäisi koko sylinterin, olisi tangenttilain sekä mittausten välinen erotus käytännössä olematon. Hän kirjoittaaakin, ettei rakentanut laitettaansa huolella eikä saavuttanut suurinta mahdollista tarkkuutta. Nervanderin lause



»Kuitenkin saavutetut tulokset ovat riittäviä, että jokainen voi arvioida kuinka pitkälle niitä on mahdollista täsmentää, kun laitteen rakentaa hyvin huolella.»

jättää vielä melko paljon lukijan mielikuvituksen varaan.

## 5 Tangenttibussolin rekonstruktio

Nervanderin artikkelissa olevan kuvauksen mukaisen laitteen rakentaminen alkoi kesällä 2005. Tuona vuonna Nervanderin syntymästä tuli kuluneeksi 200 vuotta. Työ alkoi tutustumisella tiettävästi ainoaan Nervanderin säilyneistä tangenttibussoleista Helsingin yliopistomuseossa Appreanumissa, jossa laite on näytteillä. Tarkkaa vuosilukua ei ole tiedossa, mutta hän on ilmeisesti rakennuttanut sen opintomatkallaan ollessaan Wienissä. Laite eroaa alkupe-  
räisessä artikkelissa kuvatussa laitteesta moneltakin osalta, mutta perusidea on säilynyt ihan samana. Tangenttibussolia rekonstruoitaessa on täytynyt tehdä omapäisiä valintoja tilanteissa, joita ei artikkelissa ollut tarkkaan kuvattu. Välillä on tehty myös tietoisesti alkuperäiskuvauksesta poikkeavia valintoja, varsinkin materiaalien sekä magneettineulan suhteen. Rekonstruoitu tangenttibussoli valmistui lopulta syksyllä 2006.

### 5.1 Rakentaminen

Tangenttibussoli on rakennettu TKK:n Radiolaboratorion työpajassa. Käytännössä kaikki osat mitta-asteikkoja lukuunottamatta on työstetty itse. Laitteesta ei rakennettu varsinaista prototyyppiä, mutta muutamia huonosti onnistuneita osia on valmistettu myöhemmin uudelleen. Työn alkaessa allekirjoittaneella ei ollut käytännössä ollenkaan kokemuksia metalliosien työstämisestä, ja varsinkin tämä osaaminen kehittyi projektin edetessä, mikä näkyy myös työstettyjen osien monimutkaisuudessa sekä laadussa. Liitteessä C on kuvia laitteen rakentamisesta sekä osista.

#### 5.1.1 Materiaalit

Heti aloitusvaiheessa tuli tehdä valintoja käytettävien materiaalien suhteen. Alkuperäiskuvauksessa puhuttiin puusta, lasista sekä kuparista. Puulajia ei erikseen oltu mainuttu. Nervanderin uudemman tangenttibussolin puuosat olivat olleet kirsikkapuuta, metalliosat hopeaa. Metallien osalta tuli valita helposti työstettäviä sekä ei magneettisia materiaaleja. Lopulta päädyttiin alumiiniin, kupariin, messinkiin sekä tinapronssiin. Puuosat ovat mäntyä. Lasi korvattiin pleximuovilla sen työstettävyyden sekä kestävyysden takia. Tukijaloissa on myös kumipohjat, jottei tangenttibussoli liukuisi pöydällä.

Aiemmin kuparin laatua vaivanneet ongelmat ovat nykyään ratkaistu, joten johdinlangat ovat lakattua käämikuparia. Kuparin sitkeyden takia sitä on

hankala mekaanisesti jyrsiä tai sorvata, eikä sitä ole muissa osissa käytetty. Kaikki valmiit ruuvit sekä mutterit ovat messinkiä. Puuosat on käsitelty kirsikkapuuta jäljittelevällä puuöljyllä.

### 5.1.2 Jalusta

Jalusta on sorvattu liimapuulevystä. Keskelle on porattu reikä sylinterikelan kehtoa varten. Jalustassa on tukipylväs joka kannattelee osoitinta kannattavan langan suojaputkea. Suojaputken asentoa (etäisyyttä tukipylvästä) voi säätää säätöruuvilla. Osoittimen korkeutta voi säädellä suojaputken päässä olevan alumiinisen nupin säätöruuveilla. Jalustassa on myös tukijalat, joita säätämällä jalusta saadaan asetettua vaakasuoraan (tähän tarvitaan lisäksi erillinen vesivaaka l. vatupassi).

### 5.1.3 Sylinterikela

Sylinterikela koostuu puukehikosta, kuparilangasta sekä kehdosta. Puukehikko on ontto ja koostuu kahdesta osasta. Puukehikon pohjan halkaisija on 107 mm ja kehikon korkeus on 28 mm, jolloin halkaisijan ja korkeuden suhteeksi saadaan  $d/h \approx 3,8$ . Sylinterikelan kattoon sekä pohjaan jyrsittiin yhden millimetrin levyiset urat, joihin johdinlangat asetetaan. Näin langat saadaan suoriksi ja tasavälein. Johdinlanka koostuu kahdesta n. 0,6 mm paksusta lakatusta kuparilangasta (eli ns. käämilankaa), jotka on kierretty toistensa ympäri. Näin langat saadaan suoriksi ja tasavälein. Virtalankapari tekee yhteensä 47 kierrosta.



Kuva 13: Rakennettu sylinterikela.

#### 5.1.4 Magneettineula sekä osoitin

Osoitin on sorvaamalla sekä jyrsimällä tehty alumiinilevystä. Osoittimessa on myös tarkkuusmitta, mutta se ei juurikaan heijastu pleksilevystä. Kokonaisuus riippuu tavallisen ompelulangan varassa. Ompelulanka aiheuttaa periaatteessa oman hankaluutensa: se on kierteellä, joten sen aiheuttama kiertovoima riippuu poikkeutuksen suunnasta.

Magneettineula ei ole oikeastaan neula, vaan koostuu kahdesta NdFeB-nappimagneetista. Kuvassa 14 näkyy »neula» osineen. Supermagneetilla on voimakas dipolimomentti ja se pyrkii kääntymään voimakkaasti ulkoisen magneettikentän suuntaan, jolloin ripustuslangan oma kiertovoima jää heikoksi, eikä näin juurikaan vaikuta poikkeutuskulmaan. Lisäksi nappimagneettiin päädyttiin »kunnon magneettineulan» valmistusvaikeuksien vuoksi. Tasaisen magnetoituman saavuttamiseksi neula pitäisi altistaa hyvin voimakkaalle tasaiselle magneettikentälle.



Kuva 14: Rekonstruoidun tangenttibussolin magneettineula koostuu kahdesta NdFeB-supermagneetista.

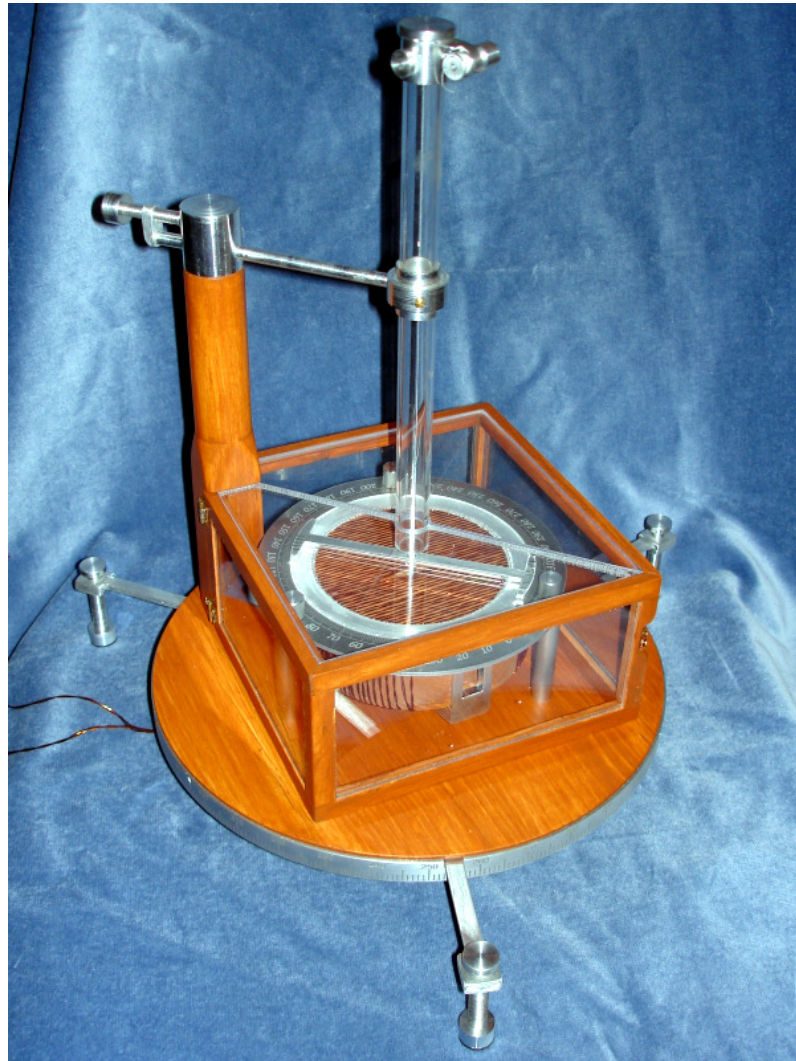
#### 5.1.5 Mitta-asteikot

Mitta-asteikot teetettiin lasermerkkausta tekevässä yrityksessä (Laser Center Finland Oy) piirustusten pohjalta. Jalustan ulkokehälle tulevan asteikon alumiininen rengas tosin tuli sorvata itse. Asteikoilla on merkinnät yhden asteen välein.

#### 5.1.6 Rakenteelliset erot Nervanderin tangenttibussoliin

Rakenteellisista eroista suurimmat ovat magneettineula ja sylinterikela. Uudessa bussolissa sylinterikelan mittasuhteet ovat erilaiset sekä virtalanka peit-

tää suuremman osan kehikosta. Nervanderin kehikko oli suhteessa korkeampi kuin nyt rakennetussa. Magneettineula on lyhyt, kun Nervanderilla se oli pitkä. Ulkonäön ja pienten yksityiskohtien suhteen on hankala tehdä vertailuja, sillä Nervanderin laitetta ei enää ole.



Kuva 15: Rekonstruoitu tangenttibussoli.

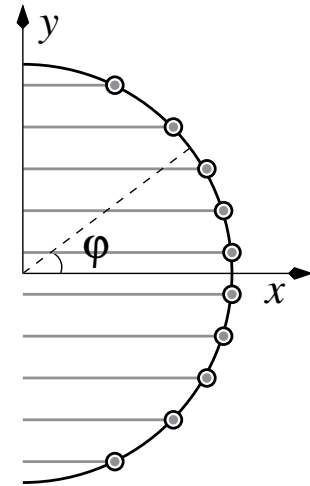
## 5.2 Tangenttibussolin analyysi

Tangenttibussolin toiminta perustuu tangenttilakiin, joka on periaatteessa hyvin yksinkertainen. Käytännössä tilanne ei kuitenkaan ole näin selkeä. Todellisuudessa Maan mängeettikenttä ei ole homogeeninen, vaan voi muuttua voimakkaastikin paikan mukaan. Myöskään sylinterikelassa kulkeva virta ei synnytä homogeenista magneettikenttää. Kentän suunta- ja amplitudijakau- maan vaikuttavat kelan mitat, kierrosten lukumäärä, käämimistiheys sekä syöttöjohdot. Lähistöllä olevat ferromagneettiset kappaleet kuten rautaiset tai teräksiset pöydänjalat, naulat, seinien tukirakenteet jne. vääristävät koko- naiskenttää. Näitä olosuhteita on hyvin vaikea ottaa mittauksissa huomioon ja yrittää korjata mittaustuloksista näiden vaikutus pois.

Tilannetta voi tarkastella aluksi kevyen analyttisesti. Sylinterikelan poh- jassa sekä katossa kulkee  $n$  määrä virtalankoja, joissa kaikissa virtaa virta  $I$ . Kokonaisvirta  $nI$  jakautuu melko tasaisesti koko pinnalle, joten pinta- virrantiheys  $J_s \approx nI/d$ , missä  $d$  on sylinterikelan pohjan halkaisija. Ääre- tön tasainen pintavirta aiheuttaisi kaikkialle vakiomagneettikentän. Ajatel- laan katto- ja pohjalevyt  $r$ -säteisiksi ympyröiksi, äärettömän ohuiksi kie- koiksi, joilla on pintavirta  $\mathbf{J}_s$ . Virta kulkee tietysti vastakkaisiin suuntiin näissä kiekkoissa. Jos säde olisi äärettömän, olisi näi- den välissä vakiomagneettikenttä.

Virtaa kulkee myös sylinterikelan vaipassa. Täl- lä virtajakauma ei ole tasainen, vaan sini- muotoinen (ks. kuva 16). Virtalangat har- venevat, kun  $\varphi$  kasvaa. Vaipalla oleva pin- tavirrantiheys noudattaa  $J_s \approx nI \cos(\varphi)/d$  riippuvuutta. Äärettömän pitkä sylinteri, jon- ka vaipassa kulkee akselinsuuntainen napa- kulmasta  $\varphi$  sinimuotoisesti riippuva pinta- virta, aiheuttaa sisälleen vakiomagneettiken- tään.

Sylinterikelan virtalangat tavallaan approksimoi- vat kahta pintavirtajakaumaa, jotka ideaalisi- na, äärettöminä aiheuttaisivat sylinterikelan si- sään täydellisen vakiomagneettikentän. Onko tä- mä sattumaa? Nervander ei perustellut sylinteri-



Kuva 16: Sylinterikelan vaipassa lankojen tiheys muuttuu kulman  $\varphi$  funk- tion.

kelan rakennetta, ainoastaan kehui sen loistokkuutta.

Todellinen sylinterikela on kuitenkin äärellinen, mutta olisiko näiden pintavirtojen magneettikenttien summa kuitenkin lähes vakio kaikkialla kelan sisällä? Osoittautuu, että näin ei kuitenkaan ole.

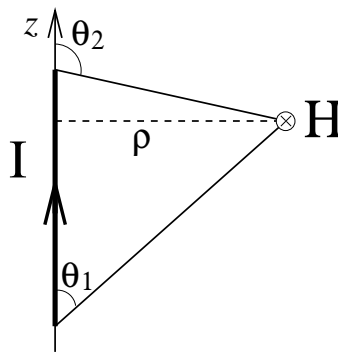
Sylinterikelan rakenteesta aiheutuvaa virhettä tangenttilakiin nähden pyrittiin selvittämään numeerisella analyysillä. Sylinterikelan sisään synnyttämää magneettikenttää voidaan arvioida numeerisilla laskuilla, joiden perusteella voidaan simuloida magneettineulan poikkeutuskulma virran funktiona. Aluksi tilannetta simuloitiin COMSOL Multiphysics-ohjelmistolla [20]. Virtalangat korvattiin virrantiheyksillä, ja näin saadut tulokset olivat rohkaisevia. Seuraavaksi tehtiin malli, jossa pintavirtojen sijaan pysyttädyttiin virtalangoissa, ja malli simuloi todellista tilannetta tarkemmin.

### 5.2.1 Sylinterikelan magneettikenttä

Numeerista analyysiä varten voidaan ajatella sylinterikelan muodostuvan yksittäisistä peräkkäinkytkeistä suorista virtalangoista. Suoran  $z$ -akselilla olevan äärellisen mittaisen virtalangan, jossa kulkee virta  $I$ , synnyttämän magneettikentän lauseke on

$$\mathbf{H}_{vl} = \mathbf{u}_\varphi \frac{I}{4\pi\rho} [\cos\theta_1 - \cos\theta_2], \quad (5)$$

missä on sekoitettu sekä sylinteri- että pallokoordinaatiston merkintöjä kuvan 17 mukaisesti.



Kuva 17: Äärellisen,  $z$ -akselilla olevan virtalangan magneettikenttä.

Edellisestä lausekkeesta saadaan muokattua suorakulmaiseen koordinaatistoon yleispätevä lauseke, missä tilanne kuvataan kenttäpisteen  $\mathbf{r}$ , virtalangan alkupisteen  $\mathbf{r}'_a$  sekä loppupisteen  $\mathbf{r}'_l$  avulla (kuva 18) tekemällä sijoitukset

$$\rho = \left| \frac{\mathbf{r}'_l - \mathbf{r}'_a}{|\mathbf{r}'_l - \mathbf{r}'_a|} \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}'_a) \right|, \quad (6)$$

$$\cos \theta_1 = \frac{\mathbf{r}'_l - \mathbf{r}'_a}{|\mathbf{r}'_l - \mathbf{r}'_a|} \cdot \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'_a}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'_a|}, \quad (7)$$

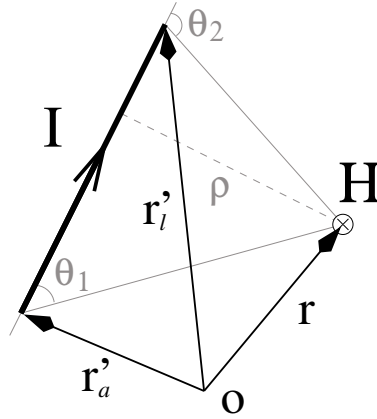
$$\cos \theta_2 = \frac{\mathbf{r}'_l - \mathbf{r}'_a}{|\mathbf{r}'_l - \mathbf{r}'_a|} \cdot \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'_l}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'_l|} \quad (8)$$

sekä

$$\mathbf{u}_\varphi = \frac{(\mathbf{r}'_l - \mathbf{r}'_a) \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}'_a)}{|(\mathbf{r}'_l - \mathbf{r}'_a) \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}'_a)|} \quad (9)$$

lausekkeeseen (5). Näin saavutetaan muoto

$$\mathbf{H}_{vl} = \frac{I}{4\pi} \frac{(\mathbf{r}'_l - \mathbf{r}'_a) \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}'_a)}{|(\mathbf{r}'_l - \mathbf{r}'_a) \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}'_a)|^2} \left[ (\mathbf{r}'_l - \mathbf{r}'_a) \cdot \left( \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'_a}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'_a|} - \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'_l}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'_l|} \right) \right] \quad (10)$$



Kuva 18: Yleisen äärellisen, suoran virtalangan magneettikenttä.

Sylinterikela koostuu yhteensä  $n$  kappaleesta suoria virtalankoja, jolloin näiden magneettikentät summautuvat, ja virran  $I$  aiheuttama magneettikenttä lopulta on

$$\mathbf{H}_I = \sum_{i=1}^n \mathbf{H}_{vl,i}. \quad (11)$$



Siis jakamalla virtalanka suoriin pätkiin voidaan laskea näiden aiheuttama magneettikenttä missä tahansa pisteessä  $\mathbf{r}$  summaamalla lankojen vaikutus tässä pisteessä. Laskemalla magneettikenttä riittävän monessa pisteessä, voidaan tehdä johtopäätöksiä magneettikentän epähomogeenisuudesta sekä arvioida kuinka suuri rakenteellinen virhe tästä aiheutuu.

Numeerista laskentaa varten lauseke (10) ei ole vielä sopivassa muodossa. Piste- ja ristitulot tulee palauttaa peruslaskutoimituksiksi. Lisäksi magneettikentän laskeminen piste kerrallaan on aivan liian hidasta. Ensin tulee määrittää pistejoukko, joissa kenttä halutaan laskea, sitten lasketaan kenttä näissä pisteissä samanaikaisesti. Laskentaa varten kirjoitettiin MATLAB-ohjelma, jonka koodi löytyy liitteenä. Käytännössä lausekkeille (6)–(9) laskettiin numeeriset arvot, jotka sijoitetaan lausekkeeseen (5), jolla magneettikenttä lasketaan komponenteittain. On huomioitavaa, että laskennassa ei ole otettu huomioon syöttöjohtojen aiheuttamia magneetikenttiä ja täten laskettu virtalanka ei muodosta suljettua virtapiiriä! Tilanne on siis epäfysikaalinen, sillä langan päihin kasaantuisi varauksia. Todellisuudessa syöttöjohtimilla on oma vaikutuksena kokonaiskenttään, mutta se on verrattain pieni.

Ensiksi ohjelmaa käytettiin laskemaan uuden rakennetun tangenttibussolin sylinterikelan magneettikenttä. Kuvassa 18 on piirrettynä magneettikentän vuoviivat, joiden väritys kertoo kentän voimakkuuden suhteutettuna sylinterikelan keskipisteen magneettikentän voimakkuuteen.

### 5.2.2 Magneettineulan kiertyminen

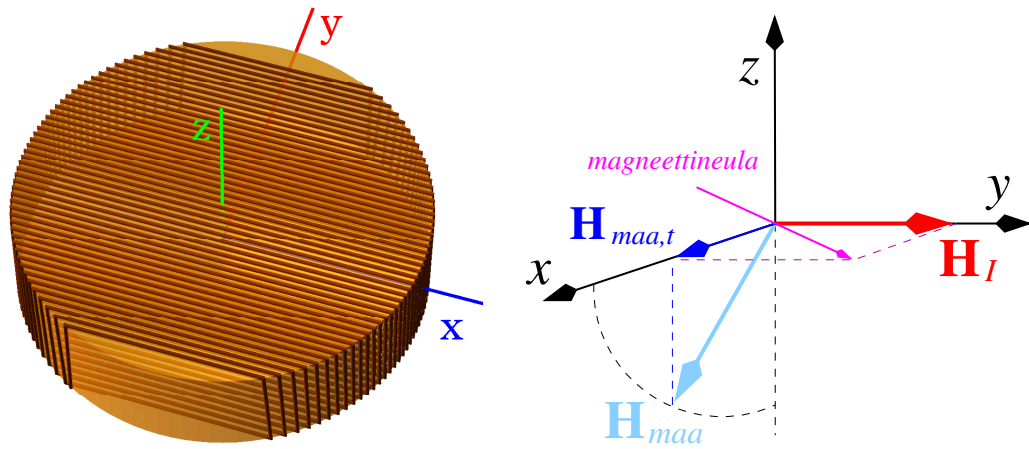
Tarkastellaan virtalangan synnyttämää magneettikenttää sylinterikelan keskellä vaakatasossa ( $xy$ -tasossa). Asetetaan origo sylinterikelan keskipisteseen, joka on samalla magneettineulan tukipiste, jonka ympäri neula voi kääntyä. Koordinaattiakselit valitaan siten, että Maan magneettikentän vaakakomponentti on  $x$ -suuntainen ja sylinterikelan magneettikenttä on  $y$ -suuntainen. Magneettineulan asentoon  $\beta$  vaikuttaa vain magneettikentän vaakakomponentti. Maan magnettikentän vaakakomponentti on

$$\mathbf{H}_{maa,t} = -\mathbf{u}_z \times (\mathbf{u}_z \times \mathbf{H}_{maa}) = \mathbf{u}_x H_{maa} \cos \vartheta, \quad (12)$$

missä  $\vartheta$  on inkliinaatio<sup>11</sup>. Tangenttibussoli taas on tarkoitus asettaa siten, että sylinterikelan magneettikentällä ei edes olisi  $z$ -komponenttia. Kuten

<sup>11</sup>Inkliinaatio on magneettikenttävektorin kallistuskulma vaakatasoon nähden.

edellä huomattiin, sylinterikelan sisälle ei synny täysin homogeenista magneettikenttää, joten myös magneettineulan eri osiin vaikuttaa erilainen magneettikenttä. Tämä taas vaikuttaa poikkeutuskulmaan. Oletetaan, että neula pääsee kiertymään vaakatasossa täysin kitkatta eikä ripustuslanka aiheuta minkäänlaista voimaa neulaan riippumatta sen asennosta. Tällöin magneettineulan magneettinen potentiaalienergia yksinään määrää poikkeutuskulman: magneettineula lopulta asettuu asentoon, jossa magneettinen potentiaalienergia on minimissään.



Kuva 19: Karteesisten koordinaattien valintojen suhtautuminen sylinterikeleeseen (vasemmalla) sekä magneettikenttiin (oikealla). Maan magneettikenttää magneettineulan suuntaan vaikuttaa oleellisesti vain vaakakomponentti.

Mallinnetaan magneettineulaa magneettidipolina, jolla on magneettinen dipolimontti  $\mathbf{p}_m$ . Magneettidipolin magneettinen potentiaalienergia homogeenisessa magneettikentässä on

$$W_m = -\mathbf{p}_m \cdot \mathbf{H}. \quad (13)$$

Jos magneettineula olisi äärettömän lyhyt, ei ongelmia olisi, sillä tässä yhdessä pisteessä magneettikenttä olisi homogeeninen, ja magneettinen potentiaalienergia olisi helppo laskea. Käytännössä magneettineula ei voi olla edes »todella lyhyt» suhteessa sylinterikelan fyysisiin mittoihin. Lisäksi koko tangenttibussolin yksi perusajatus oli käyttää pitkää neulaa, jolla on suurempi herkkyys kuin lyhyellä neulalla.

Magneettineula voi olla missä tahansa asennossa poikittaistasossa, eli  $\mathbf{p}_m = \mathbf{p}_m(\beta)$ . Kokonaismagneettikenttä  $\mathbf{H}_{kok}$  koostuu Maan magneettikentästä  $\mathbf{H}_{maa}$  sekä virran aiheuttamasta magneettikentästä  $\mathbf{H}_I = \mathbf{H}_I(I, \mathbf{r})$ , jotka ovat (pääosin) toisiaan vastaan kohtisuorassa. Oletetaan, että Maan magneettikenttä on täysin homogeeninen neulan alueella ja epähomogeenisuutta on ainoastaan virran aiheuttamassa magneettikentässä. Käytetään magneettineulan pituudelle symbolia  $L$ . Määritellään keskiarvoistettu magneettikenttä integraalina

$$\mathbf{H}_{ka}(\beta, I, L) = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} (\mathbf{H}_{maa,t} + \mathbf{H}_I(I, \mathbf{r})) dl(\beta), \quad (14)$$

missä integrointi suoritetaan magneettineulan suuntaisesti. Näin saatu keskiarvoistettu kenttä ajatellaan homogeeniseksi, siinä mielessä, että se vaikuttaa kaikkiin neulan osiin samalla tavalla. Näin saadaan laskettua arvio neulan magneettiselle potentiaalienergialle

$$W_m(\beta, I, L) = -\mathbf{p}_m(\beta) \cdot \mathbf{H}_{ka}(\beta, I, L). \quad (15)$$

Nyt etsitään  $W_m$ :n minimi  $\beta$ :n suhteen (pitämällä  $I$  ja  $L$  vakioina). Tähän kulmaan  $\beta_{min(W_m)}$  magneettineula lopulta asettuu. Määritellään kulma  $\beta_0$  siksi kulmaksi, mihin neula asettuu, kun virtaa ei kulje. Tällöin magneettineula kääntyy ainoastaan Maan magneettikentän suuntaiseksi riippumatta neulan pituudesta. Poikkeutuskulma  $\alpha = \alpha(I, L)$  saadaan nyt laskettua

$$\alpha(I, L) = \beta_{min(W_m)}(I, L) - \beta_0. \quad (16)$$

Käytännössä laskenta suoritettiin numeerisesti. Laskentaa helpottaa suuresti se, että koska  $\mathbf{H}_I$  on suoraan verrannollinen virtaan  $I$ , voidaan se kirjoittaa muodossa  $\mathbf{H}_I(I, \mathbf{r}) = I\mathbf{A}(\mathbf{r})$ , missä  $\mathbf{A}(\mathbf{r})$  sisältää ainoastaan kentän paikka-riippuvuuden. Tällöin (14) voidaan kirjoittaa muodossa

$$\mathbf{H}_{ka}(\beta, I, L) = \mathbf{H}_{maa,t} + \frac{2I}{L} \int_0^{L/2} \mathbf{A}(\mathbf{r}) dl(\beta), \quad (17)$$

missä on hyödynnetty symmetriaa keskipisteen suhteen. Huomataan, ettei integraalia tarvitse laskea aina uudelleen eri virran arvoilla. Lausekeen (17) integraali laskettiin käytännössä äärellisenä summana

$$\mathbf{H}_{ka}(\beta, I, L) \approx \mathbf{H}_{maa,t} + \frac{I}{N} \sum_{i=0}^N \mathbf{A}(\mathbf{r}_i), \quad (18)$$

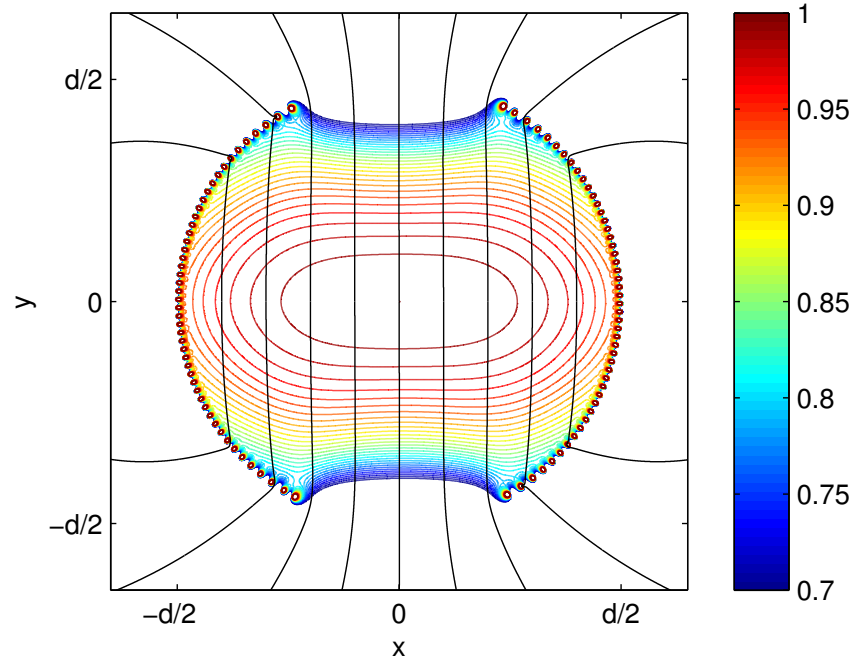
missä

$$\mathbf{r}_i = \frac{iL}{2N}(\mathbf{u}_x \cos \beta + \mathbf{u}_y \sin \beta), \quad i = 0, 1, \dots, N. \quad (19)$$

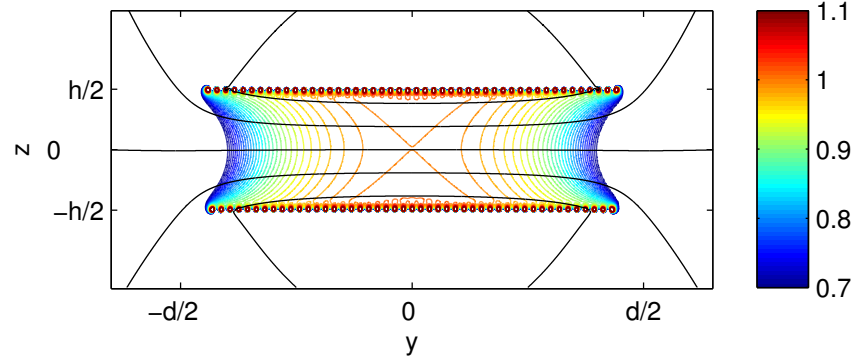
Sylinterikelan magneettikenttä on sen verran homogeeninen, että  $N$  voi olla varsin pieni ilman, että tarkkuus erityisemmin kärsii. Laskuissa käytettiin arvoja  $N = 5 \dots 33$  riippuen magneettineulan pituudesta.

### 5.2.3 Numeeriset tulokset

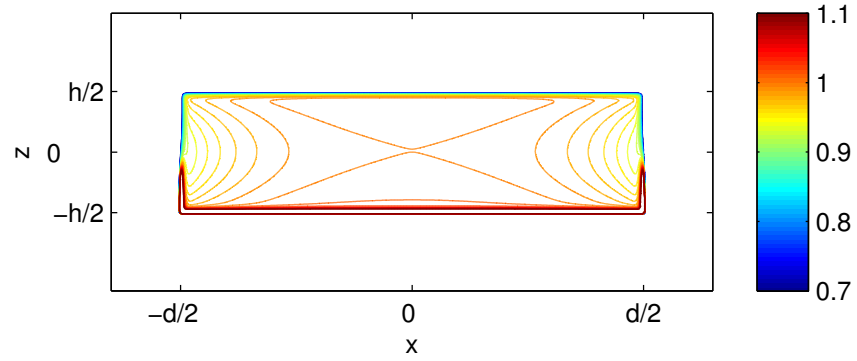
Matlab-ohjelmilla laskettiin sylinterikelan synnyttämä magneettikenttä. Kuvissa 20-22 on visualisoitu kenttäjakaumaa kentänvoimakkuuden tasa-arvokäyrillä. Kentän voimakkuus on normeerattu siten, että keskipisteessä on kentän voimakkuus  $H_I = 1$ . Tasa-arvokäyrät on piirretty sadasosan välein, eli kahden tasa-arvokäyrän välissä kentän voimakkuus muuttuu vain yhden prosentin. Kuvassa 20 on tilanne leikkaustasossa  $z = 0$ , kuvassa 21 leikkaustasossa  $x = 0$  ja kuvassa 22 leikkaustasossa  $y = 0$ . Kuviin 20 ja 21 on piirretty myös vuoviivat, jotka kertovat kentän suunnan, projisoituina leikkaustasoon.



Kuva 20: Virran synnyttämän magneettikentän voimakkuuden tasa-arvokäyrät tasossa  $z = 0$ . Kentänvoimakkuus on suhteutettu keskipisteen kentänvoimakkuuteen. Kuvassa lisäksi vuoviivojen projektio tasoon.

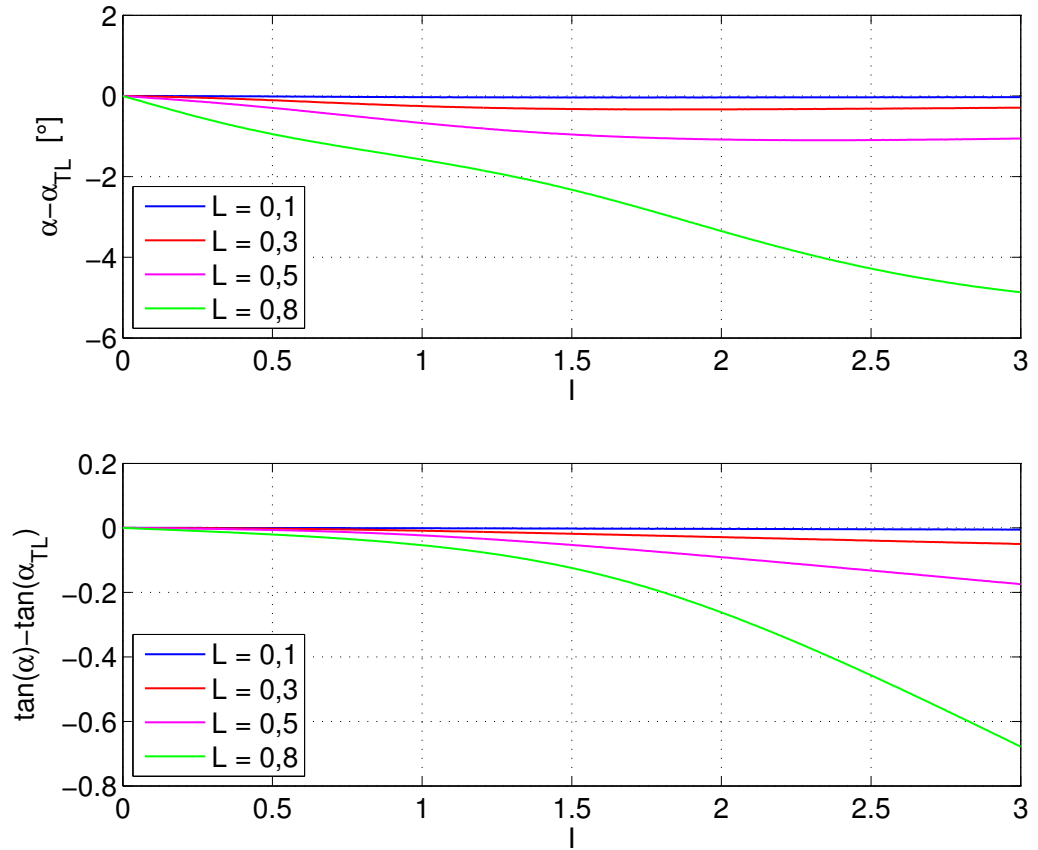


Kuva 21: Virran synnyttämän magneettikentän voimakkuuden tasa-arvokäyrät tasossa  $x = 0$ . Kentänvoimakkuus on suhteutettu keskipisteen kentänvoimakkuuteen. Kuvassa lisäksi vuoviivojen projektiio tasoon.



Kuva 22: Virran synnyttämän magneettikentän voimakkuuden tasa-arvokäyrät tasossa  $y = 0$ . Kentänvoimakkuus on suhteutettu keskipisteen kentänvoimakkuuteen.

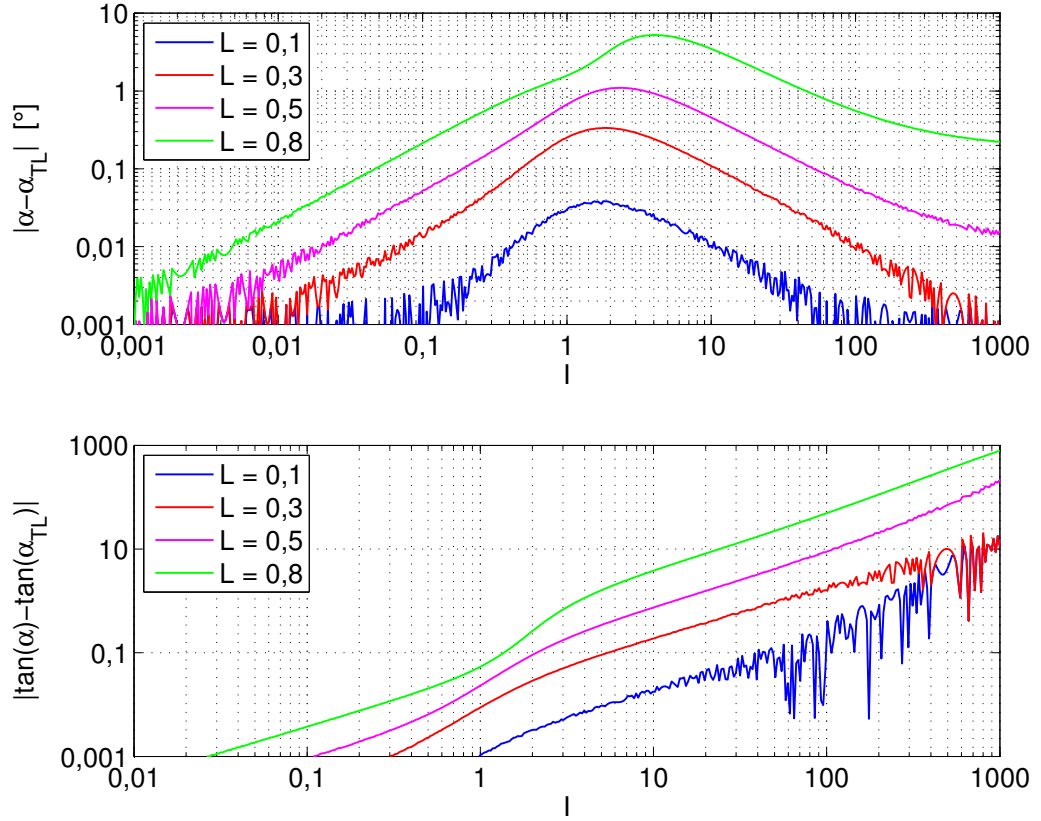
Kuvissa 23 ja 24 on esitetty eripituisten magneettineulojen käyttäytymistä virran funktiona. Neulan pituus  $L$  on esitettyinä suhteessa sylinterikelan pohjan halkaisijaan. Virta on normeerattu siten, että virran arvolla  $I = 1$  (laaduton luku) sylinterikelan keskipisteen magneettikenttä on yhtä voimakas kuin Maan magneettikentän vaakakomponentti. Kuvassa 23 on esitettyinä poikkeutuskulman virhe sekä poikkeutuskulman tangentin virhe (virheellä tässä tarkoitetaan erotusta tangenttilakiin nähden) virran arvoilla  $0 \leq I \leq 3$ . Kuvassa 24 on esitettyinä poikkeutuskulman sekä sen tangentin virheiden itseisarvot virran arvoilla  $0,001 \leq I \leq 1000$ .



Kuva 23: Poikkeutuskulman  $\alpha$  sekä sen tangentin virheet suhteessa tangenttilakiin.

Tuloksista voi vetää johtopäätöksen, että varsinkin lyhyellä neulalla yhteneväisyys tangenttilain kanssa on todella hyvä. Kuvista on havaittavissa, että virhe on suurimmillaan kun  $I = 1 \dots 4$  riippuen neulan pituudesta, ja pienenee kun  $I$  kasvaa suureksi. Nähdään myös, että poikkeutuskulma jää liian pieneksi tangenttilakiin nähden. Syytä virheelle voi hakea amplitudijakauman muodosta: magneettikentän voimakkuuden tasa-arvokäyrät ovat kovin »litistyneitä», eli  $x$ -akselilla kentänvoimakkuus pysyy melko tasaisena, kun taas  $y$ -akselilla kentänvoimakkuus heikkenee voimakkaasti, kun etäännyttään keskipisteestä. Sen sijaan magneettikentän suuntajakauma on varsin tasainen.

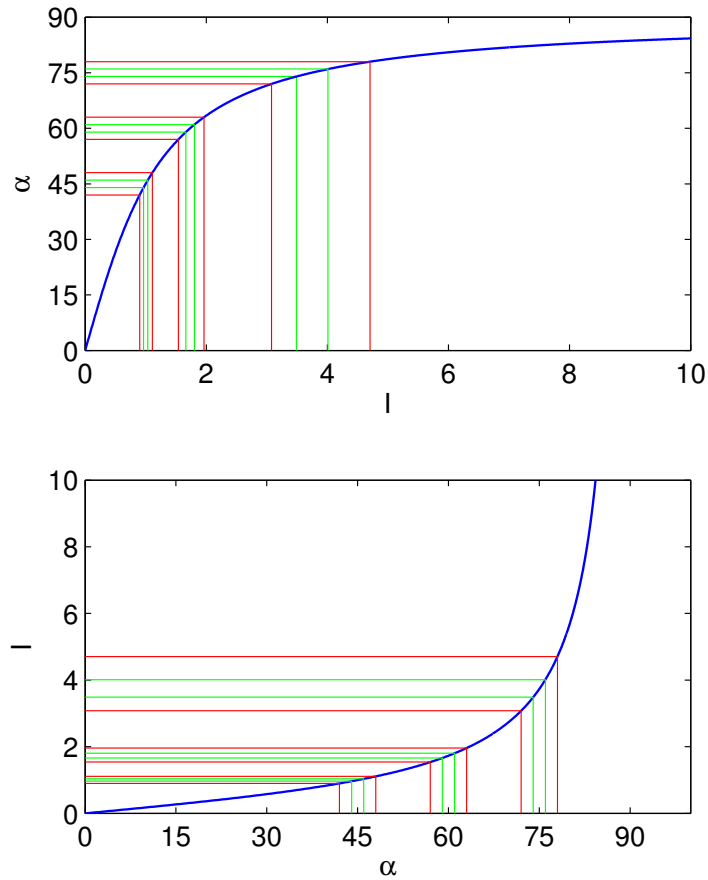
Mitä pidempi neula on, sitä voimakkaammin magneettikentän epähomogee-



Kuva 24: Poikkeutuskulman  $\alpha$  sekä sen tangentin virheiden itseisarvot suhteessa tangenttilakiin.

nisuus vaikuttaa. Tämä näkyy myös virheessä. Kuitenkin lopulta virhe pienenee, kun virta kasvaa suureksi. Tämä johtuu siitä, että virran kasvaessa suureksi myös virran aiheuttama magneettikenttä kasvaa niin suureksi, että Maan magneettikenttä ei juurikaan vaikuta neulan suuntaan. Sen sijaan poikkeutuskulman tangentissa on suuri virhe. Suurilla kulmilla pienikin muutos kulmassa näkyy suurena muutoksena kulman tangentissa.

Kohtuullisilla poikkeutuskulmilla virhe jää melko pieneksi, ellei neula ole todella pitkä. Mutta mitä tarkoittavat *kohtuullinen poikkeutuskulma* ja *melko pieni*? Tarkastellaan tilannetta aluksi ihan tangenttilain pohjalta. Kuvassa 25 on piirrettynä normitettu virta sekä poikkeutuskulma toistensa funktioina. Tangenttibussolinhan on tarjottu toimia mittalaitteena, jolla mitataan virran voimakkuutta lukemalla asteikolta sen aiheuttama poikkeutuskulma ja



Kuva 25: Tangenttilain määräämä poikkeutuskulma  $\alpha$  virran  $I$  funktiona. Suurilla poikkeutuskulmilla pieni virhe kulmaa luettaessa aiheuttaa suuren virheen mitattavan virran arvoon.

laskemalla tästä tangentti. Tutkitaan virran virhettä, kun kulman lukutarkkuus on  $1^\circ$  tai  $3^\circ$ . Suurilla poikkeutuskulmilla pienikin poikkeama kulmassa aiheuttaa suuren poikkeaman virrassa, ja tarkat mittaukset ovat tällöin käytännössä mahdottomia. Poikkeutuskulman ollessa alle  $45$  astetta ( $I = 1$ ), voidaan mittauksen dynamiikkaa pitää kohtuullisena. Kun virtaa kasvatetaan edelleen, poikkeutuskulma ei muutu enää niin voimakkaasti, ja mittauksen dynamiikka kärsii. Myös laitteen rakenteesta aiheutuva epävarmuus on pahimmillaan normitetun virran ollessa  $2 < I < 4$ .

Laskennassa tehtiin useita oletuksi, approksimointeja sekä jätettiin tiettyjä asioita huomioimatta. Huomiotta jäivät syöttöjohdot, sylinterikelan katossa



langan vääristyminen sekä ripustuslangan aiheuttama kiertovoima. Virtalanka koostui kahdesta johtimesta, jotka oli kierretty toistensa ympärille. Tätä ei otettu mitenkään huomioon. Maan magneettikenttä oletettiin homogeeniseksi. Magneettineulan suhteen tehtiin useita oletuksia. Se oletettiin äärettömän ohueksi ja lisäksi tasaisesti magnetoituneeksi.

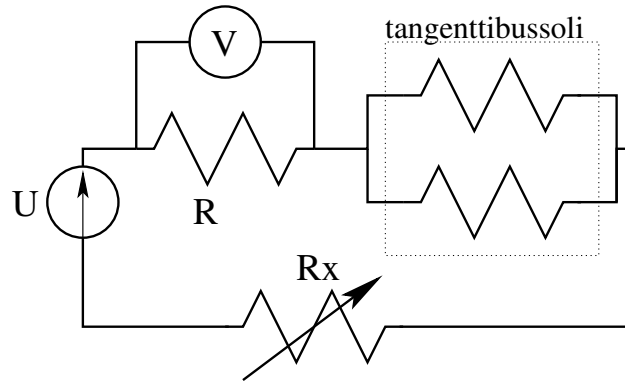
### 5.3 Mittauksen tangenttibussolilla

Rakennetulla tangenttibussolilla tehtiin muutamia mittauksia, tarkoituksena selvittää toimiiko laite oletetulla tavalla, vastaavatko mittaustulokset numeerista analyysiä sekä arvioida mittaamisen nopeutta, tarkkuutta sekä mahdollisia hankaluuksia. Mittauksia tehtiin kaksi, jotka ovat luonteeltaan samalaisia.

#### 5.3.1 Mittausjärjestely

Mittausjärjestely poikkeaa Nervanderin tekemistä mittauksista. Kuvassa 26 on piirikuva mittausjärjestelystä. Jännitelähteenä toimi säädettävä VELLEMAN 0...30 V / 0...10 A LABO POWER SUPPLY. Jännitemittarina käytettiin tavallista yleismittaria (METEX 3800), jolla mitattiin jännitettä vastuksen  $R$  ( $R = 83 \Omega$  nimellinen, mittausjohtojen kanssa mitattu  $84\Omega$ ) yli. Säästövastusta sekä jännitelähdettä säätämällä mitattavan vastuksen yli asetettiin haluttu jännite ja tangenttibussolista luettiin poikkeutuskulma, kun neula oli asettunut paikoilleen. Tangenttibussolin virtalangat kytkettiin rinnan, jolloin molemmissa langoissa kulki yhtä suuri virta ja tangenttibussoli kuormitti piiriä mahdollisimman vähän. Tangenttibussoli oli pöydän päällä, jolloin pöydän metalliset jalat aiheuttivat varmasti mittaukseen epätarkkuutta.

Ensimmäisessä mittauksessa vastuksen  $R$  yli asetettiin jännitteet 200 mV:n välein (0...2,8 V). Mittaukset tehtiin syöttämällä virta kumpaakin suuntaan ja koko mittaussarja tehtiin kahteen kertaan, jolloin kullakin jännitteellä saatiin yhteensä 4 lukemaa, joista keskiarvona laskettiin mittaustuloksissa esiintyvä poikkeutuskulma. Osoittimen asento »luettiin» asteikolta ottamalla siitä kuva digitaalikameralla ja varsinainen asento tarkastettiin kameran näytöltä. Tämä paransi mittaustarkkuutta, sillä osoittimen asennon lukeminen suoraan asteikolta silmämääräisesti ei ollut kovin helppoa. Tällä tavoin osoittimen asento saatiin luettua noin puolen asteen tarkkudella.



Kuva 26: Mittauskytkentä: vastuksen  $R$  yli olevaa jännitettä säädetään jännitelähteen ja säätövastuksen avulla.

Toinen mittaus oli samanlainen, paitsi että jännitettä kasvatettiin 0,5 V:n välein (0...4 V). Jännitteitä vastaavat virrat lasketaan kaavalla

$$I = \frac{U}{R}, \quad (20)$$

missä  $U$  on vastuksen yli mitattu jännite ja  $R$  on vastuksen resistanssi. Jotta tuloksia voisi verrata tangenttilakiin tai numeeriseen analyysiin, täytyy Maan magneettikenttä tuntea. Laskuissa on käytetty Maan magneettivuontiheydelle arvoa<sup>12</sup>  $\mathbf{B}_{maa} = \mu_o \mathbf{H}_{maa} = 52 \mu\text{T}$  ja inkлинаatio  $73^\circ$ .

Mittaaminen osoittautui hankalaksi. Kun syöttövirtaa muutetaan, alkaa osoitin värähdellä ja värähdysten vaimenemiseen menee useita minuutteja. Tämä teki mittaamisesta todella hidasta. Myös sylinterikelan oikean asennon hakeminen oli hankalaa. Maksimipoikkeaman etsiminen olisi vienyt aikaa tunteja, ellei päiviä, joten lopulta tyydyttiin muutamaan pistokokeeseen, joiden perusteella sylinterikela saatiin asetettua oikeaan asentoon noin asteen tarkkuudella.

### 5.3.2 Mittaustulokset

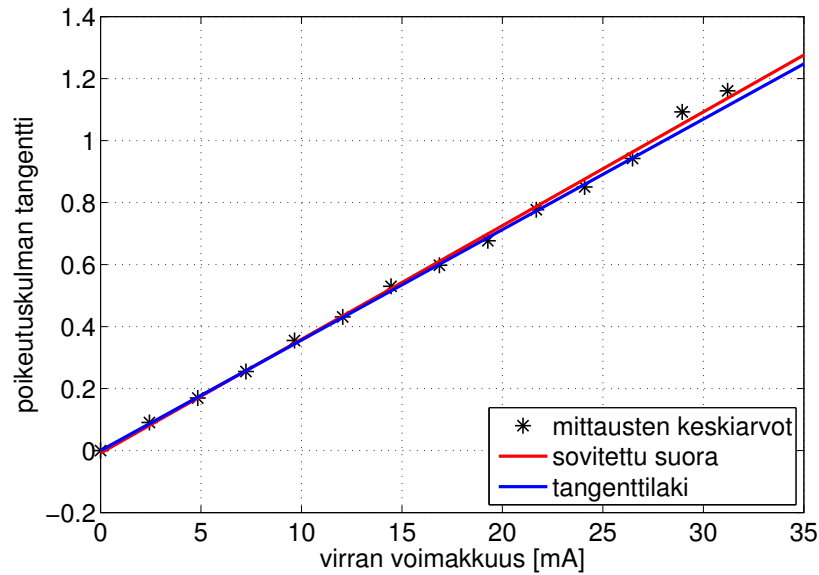
Kuvassa 27 on esitetty ensimmäisen mittauksen tulokset. Kuvassa on myös mittausdataan sovitettu suora sekä tangenttilakia vastaava käyrä. Mittatut arvot sopivat todella hyvin tangenttilakiin, ottaen huomioon lähtökohtaiset

<sup>12</sup>lähde: Kari Pajunpää, Ilmatieteen laitoksen Nurmijärven geofysiikan observatorion johtaja

epätarkkuudet (mittausympäristö, Maan magneettivuota ei tunneta tarkkaan, osoittimen asennon lukutarkkuus, sylinterikelan asennon epätarkkuus). Mittauksen perusteella laskettiin sylinterikelalle *kelavakio*  $f$ , joka määritellään tässä virran synnyttämän magneettikentän sekä syötetyn virran suhteeksi eli

$$f = \frac{H_I}{I}. \quad (21)$$

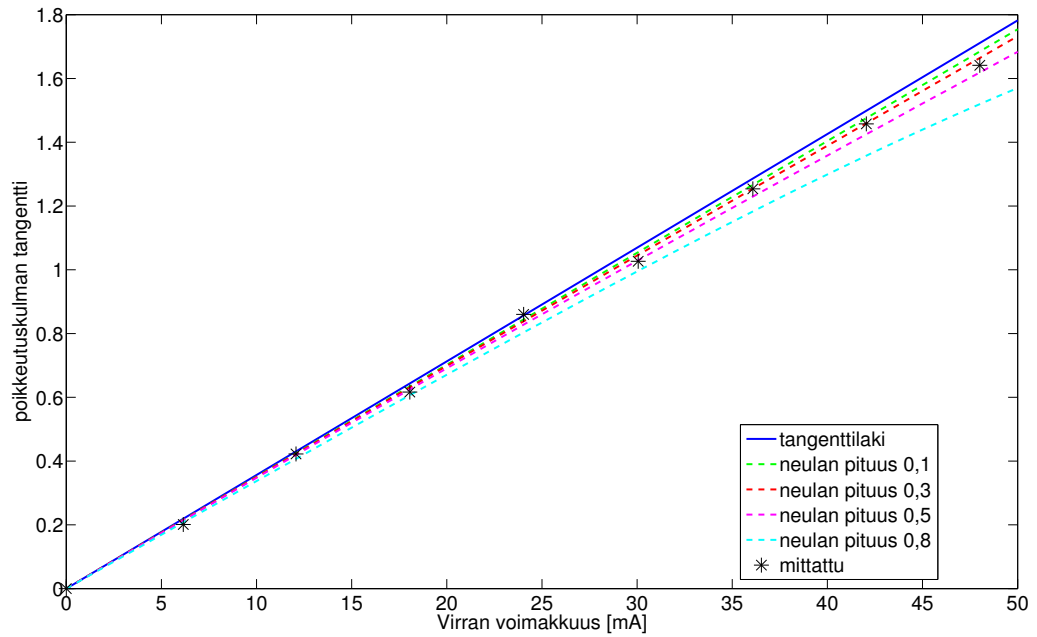
Laskemalla  $f$  sovitetun suoran kulmakertoimen kautta, päädytään arvoon  $f_1 = 440$  1/m.



Kuva 27: Ensimmäisen mittauksen mittautulos. Mitattujen poikeutuskulmien tangenttien sekä syötetyn virran välillä on lähes lineaarinen suhde.

Kuvassa 28 on esitetty toisen mittauksen tulokset. Kuvaan on myös piirretty tangenttilain määrittämä käyrä sekä numeerisella analyysillä saadut ennusteet. Mittausdata sovituu parhaiten punaiseen käyrään, joka vastaa tilannetta, jossa magneettineulan pituus on 0,3 kertaa sylinterikelan pohjan halkaisija. Todellisuudessa »neula» on lyhyempi, mutta toisaalta melko paksu, mitä ei huomioitu numeerisessa analyysissä. Mittauksen perusteella laskettu kelavakio  $f_2 = 418$  1/m.

Lasketaan mittauksen perusteella määräytyistä kelavakioista keskiarvo  $f_{ka} = 429$  1/m. Numeerisen analyysin perusteella kelavakioksi rakennetulle laitteelle



Kuva 28: Toisen mittauksen mittaustulos. Mitattujen poikkeutuskulmien tangentit suhteessa numeeristen simulaatioiden ennusteisiin. Mittauspisteet sovittuvat parhaiten tapaukseen, jossa magneettineulan pituus suhteessa sylinterikelan pohjan halkaisijaan on n. 0,3.

saadaan  $f_{num} = 425 \text{ 1/m}$ . Mitatut arvot vastaavat varsin hyvin numeerisen analyysin kautta saatavaa arvoa.

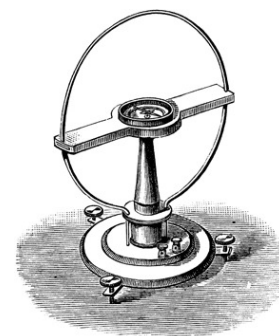
Mittaukset osoittavat tangenttibussolin toimivan oletetulla tavalla: koska magneettineula on lyhyt, on toiminta lähes tangenttilain mukaista. Kun otetaan huomioon eri lähteistä aiheutuva mittauserävarmuus, on mittausten yhtenevyys numeeriseen analyysiin yllättävän hyvä. Yksittäisissä mittauspisteissä poikkema ennusteesta tosin oli välillä kohtuu suuri, mutta keskiarvoistaessa poikkeamat tasoittuvat. Huolellisemmilla mittauksilla olisi ehkä saavuttanut vielä paremman tarkkuuden, mutta tällöin mittauksiin olisik kulu- nut huomattavasti pidempi aika, eikä näin tarkat mittaukset ole työn kan- nalta oleellisia.

Virtamittarina tangenttibussoli on varmasti ollut aikanaan ihan pätevä laite, mutta nykyaikana sen tarkkuus, nopeus sekä käytännöllisyys ovat auttamatta liian huonot.

## 6 Galvanometrien kehitys

Kun Nervanderin Pariisissa pitämästä esitelmästä oli kulunut noin 100 vuotta, julkaistiin 1934 artikkeli galvanometrien evoluutiosta [21] *Journal of Scientific Instruments* -lehdessä. Kirjoituksessa vilisee henkilöitä, jotka ovat vaikuttaneet aikanaan galvanometrien kehitykseen ja täten luonut pohjaa nykyaikaiselle virtamittaukselle, elektroniikalle sekä koko tietoyhteiskunnalle, mutta Nervanderista ei löydy mainintaa.

Schweiggerin multiplikaattori oli tiettävästi ensimmäinen galvanometri. Sen perusajatuksen, virtalangan kiertämisen magneettineulan ympärille, hän esitti jo vuonna 1820. Leopoldo Nobili (1785–1835) kehitti astaattisen galvanometrin vuonna 1825, jonka perusajatuksena on lanka, johon ripustetaan kaksi magneettineulaa, joiden navat ovat vastakkain ja virtalangan magneettivaikutus kohdistuu vain toiseen neuloista. Tällä tavalla Maan magneettisuus ei vaikuta neulan asentoon. Astaattista galvanometriä käytettiin aluksi lähinnä virran havaitsemiseen, ei varsinaiseen mittaukseen. Myöhemmin lanka korvattiin jäykemmällä materiaalilla, joka antoi nauloille vastamomentin, ja näin virran voimakkuus voitiin määrätä kiertokulmasta. Tällaista laitetta kutsutaan torsiogalvanometriksi. Pouillet kehitti vuonna 1837 oman tangentialgalvanometrinsä sekä sinigalvanometrinsä. Pouilletin tangentialgalvanometrissä oli suuri renkaanmuotoinen kehä, joka koostui yhdestä tai useammasta virtalangasta ja jonka keskellä magneettineula oli. Ongelmana tässä oli se, että renkaanmuotoinen virtalanka aiheuttaa varsin epähomogeenisen magneettikentän ja Johann Poggendorff (1796–1877) osoittikin, että magneettineulan pituuden tulisi olla n.  $1/12$  renkaan halkaisijasta, jotta tangentiallaki olisi voimassa. Hermann von Helmholtz (1821–1894) ehdotti vuonna 1849 kahta tällaista virtasilmukkaa, jotka olisi erotettuna kehän säteen verran toisistaan ja magneettineula olisi näiden välissä. Tämä oli todellinen parannus tangentialgalvanometriin, ja rakenteellisesti kilpailukykyinen Nervanderin tangentialbussolin kanssa.



Kuva 29: Pouilletin ja Helmholtzin ideoihin perustuvat tangentialgalvanometrit.

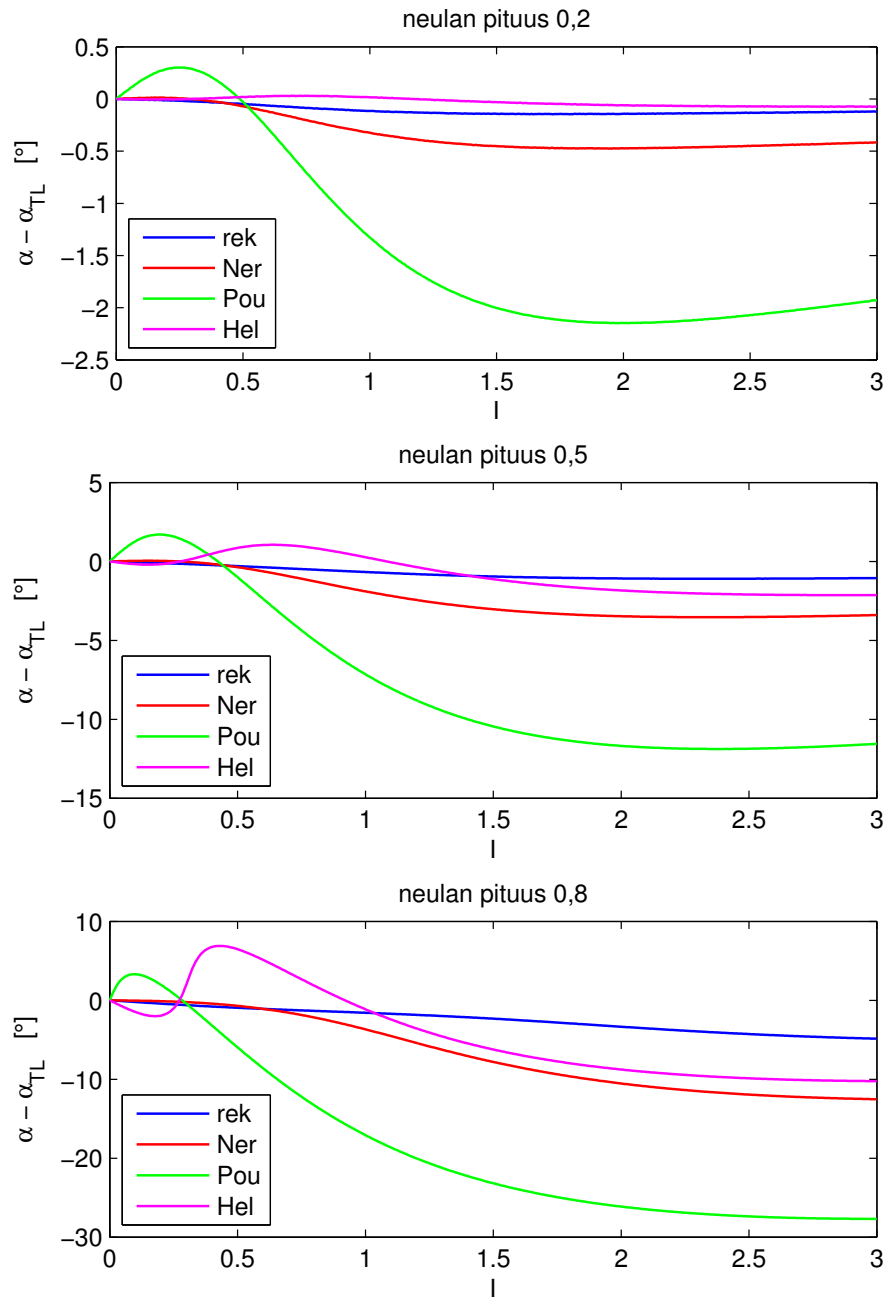
Myöhemmin osoitinneula korvattiin peilillä, joka paransi lukutarkkuutta huomattavasti. Magneettineulojen värähtelyä vaimennettiin neulan lähelle tuoduilla epämagneettisilla metallilevyillä, jolloin värähdysten liike-energia hukkaantui metallilevyyn indusoituneihin pyörrevirtoihin. Toinen tapa oli laskea virta suoraan värähtelytaajuudesta, sillä näiden välillä on yhteys. Erilaisten parannusten ja uusien ideoiden kautta ovat syntyneet nykyaikaiset analogiset kiertokäämimittarit, jotka kuitenkin perustuvat jo 1800-luvun alkupuolella tehtyihin havaintoihin. Nykyään digitaalitekniikan yleistyessä analogiset mittalaitteet joutuvat väistymään.

### 6.1 Tangenttigalvanometrien kvantitatiivinen vertailu

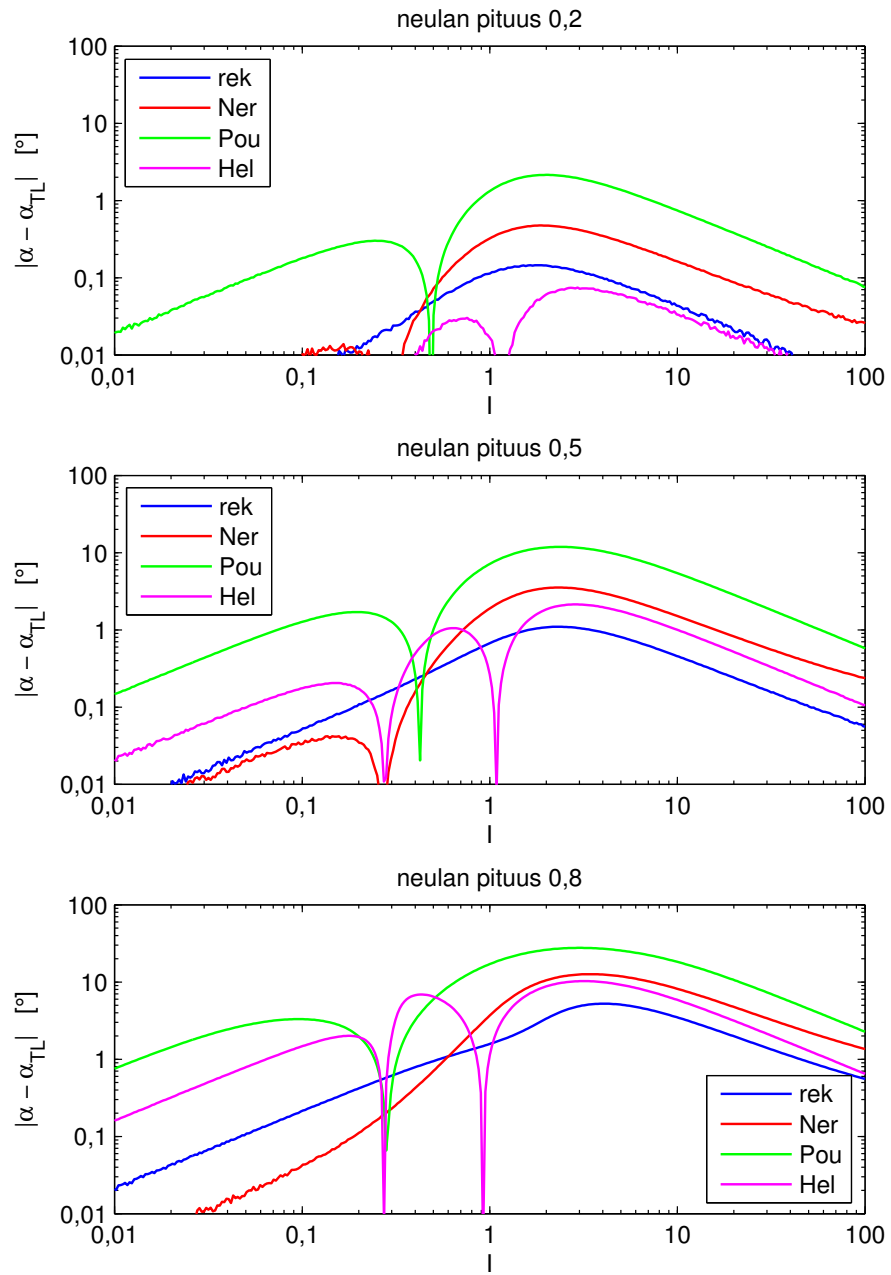
Luvussa 5.2 esiteltyä numeerista analyysiä voidaan soveltaa myös Nervanderin alkuperäiskirjoituksessaan kuvaileman sylinterikelan, Pouilletin yksinkertaisen virtasilmukan sekä Helmholtzin kahden silmukan tangenttigalvanometrin analysoimiseen ja verrata näitä sekä nyt rakennettua galvanometriä keskenään. Näille saadaan laskettua arvio poikkeutuskulmasta virran sekä magneettineulan pituuden funktiona. Kuvissa 30 ja 31 on piirretty poikkeutuskulmien virheet virran funktiona muutamalla eri magneettineulan pituudella. Magneettineulan pituus on suhteutettu sylinterikelan halkaisijaan tai silmukoiden tapauksessa silmukan halkaisijaan. Laskuissa syöttöjohtojen vaikutusta ei ole otettu huomioon. Pouilletin ja Helmholtzin tangenttigalvanometrien tapauksessa oletettiin virtalankojen olevan yksikertaiset silmukat. Käytännössä nämä voivat koostua useista johtimista, jotka ovat yhdessä nipussa. Kenttäjakaumakuvia on esitetty liitteessä B.

Näiden kuvien perusteella voidaan sanoa, että Nervanderin tangenttibussoli voittaa Pouilletin tangenttigalvanometrin tarkkuudessa. Helmholtzin esittämä kahden silmukan rakenne on paras, kun neula on lyhyt, mutta pidemmällä neulan pituuksilla tasaisesti käämitty virtalanka tuottaa pienemmän virheen. Helmholtzin tangenttigalvanometri syntyi vasta 15 vuotta Nervanderin alkuperäisbussolin jälkeen, ja tässä vaiheessa Nervanderinkin tangenttibussoli oli kokenut useita parannuksia ja tarkkuus oli kasvanut.

On tosin huomioitava, etteivät nämä kuvat paljasta mitään käytännöllisistä eroista, kuten valmistuskustannuksista, laitteiden kalibroinneista, kestävyydestä tms. Pouilletin laitteella on ehkä ollut muita etuja, jotka ovat johtaneet tämän kehityssuunnan ylivaltaan.



Kuva 30: Tangenttialvanometrien vertailua magneettineulan eri pituuksilla: simuloitu poikkeutuskulman virhe tangenttilakiin nähden rekonstruoidun tangenttibussolin (rek), Nervanderin alkuperäistangenttibussolin (Ner), Pouilletin tangenttialvanometrin (Pou) sekä Helmholtzin tangenttialvanometrin (Hel) tapauksessa normitetun virran funktiona.



Kuva 31: Tangenttigalvanometrien vertailua magneettineulan eri pituuksilla: simuloitu poikkeutuskulman virheen itseisarvo tangenttilakiin nähden rekonstruoidun tangenttibussolin (rek), Nervanderin alkuperäistangenttibussolin (Ner), Pouilletin tangenttigalvanometrin (Pou) sekä Helmholtzin tangenttigalvanometrin (Hel) tapauksessa normitetun virheen funktiona logaritmisella asteikolla.



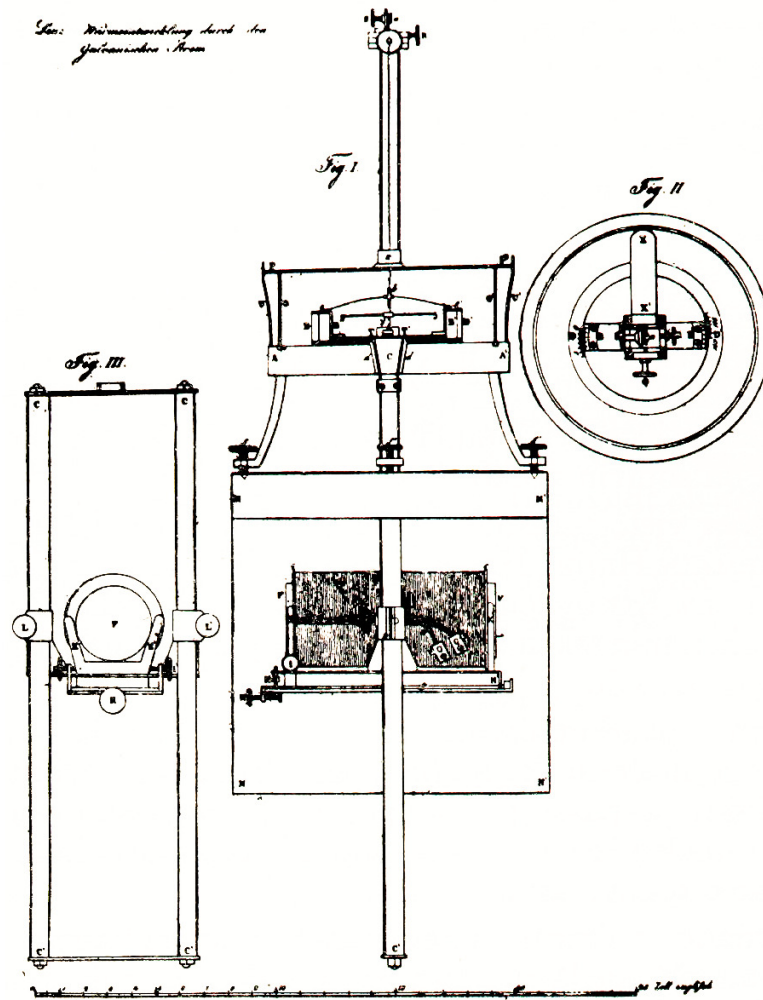
## 6.2 Nervanderin tangenttibussolin jatkokehitys

Nervander valmistutti parannellun version alkuperäisestä laiteestaan Wienissä vuonna 1835. Kuvassa 32 näkyy ilmeisesti juuri tuolta ajalta oleva tangenttibussoli, joka kuuluu Helsingin yliopiston museon, *Arppeanumin*, kokoelmiin. Parannuksia oli mm. osoittimen »tarkkuusmitan» korvaaminen pitkällä suoralla metallilangalla, materiaalien suhteen (käytetty hopeaa huonolaatuisen kuparin sijaan), sylinterikelan langan käämiminen lähes koko kehikon ympäri. Ehkä suurinta ongelmaa, neulan värähtelyä, ei ilmeisesti saatu kuriin. Jos Nervander ei ollut aivan tyytyväinen alkuperäisen tangenttibussolinsa laatuun, niin tästä on ainakin sanottava, että työn laatu vaikuttaa hyvältä. Varsinkin sylinterikelan kannatuslaitteet sekä mitta-asteikot antavat kuvan tuon ajan käsityötaidoista. Näitä laitteita hankittiin tiettävästi useampaankin laitokseen sekä yliopistoon.



Kuva 32: Helsingin yliopistomuseon kokoelmiin kuuluva Nervanderin tangenttibussoli. Laite vahingoittui Helsingin pommitusten yhteydessä 1944.

Pietarista Helsinkiin palattuaan Nervander suunnitteli vielä uuden version tangenttibussolistaan, joka toteutettiin Pietarissa Lenzin ja Jacobin johdosta vuonna 1838. Tämä Nervanderin ideaan perustuva tangenttibussoli ilmeisesti otettiin yleisemminkin käyttöön varsinkin Pietarissa. Tuntemattomasta syystä Nervander ei julkaissut uuden tangenttibussolinsa teoreettista perustaa. Sen sijaan Lenz esitteli laitteen kuvauksen sekä mittauksia vuonna 1842. Kuvassa 33 on kaavakuva laitteesta.



Kuva 33: Nervanderin ideoima paranneltu tangenttibussoli. Laite rakennettiin Pietarissa Lenzin ja Jacobin toimesta [8].

Nervander rakensi myös siirrettävän magneettisen havaintolaitteen vuonna 1837, mutta huonolaatuisen kuparin vuoksi projekti raukesi.

Helsingin yliopistomuseossa on toinenkin tangenttibussoli, joka perustuu Nervanderin ideaan. Tämä on Berliinistä ja rakennettu 1864.

## 7 Yhteenveto

Työn tavoitteina oli luoda katsaus historiaan, tutustua Nervanderin tangenttibussolitutkielmaan, rekonstruoida tangenttibussoli, tutkia sen ominaisuuksia sekä varmentaa tangenttibussolin toiminta mittauksin.

Historiatutkimus antoi kirjoittajalle aivan uuden näkemyksen sähkötekniikan kehityksestä 1800-luvulla. Vaikka sähkö tuli osaksi ihmisten jokapäiväistä elämää vasta myöhemmin, on sähköä tutkittu pitkään. 1820-luvulla kehitys on ollut todella nopeaa. Sähkövirran magneettivaikutusta kuvaavat peruslait saatiin formuloitua jo samana vuonna kun Örstred teki kuuluisat kokeensa. Myös tiedonkulku ympäri maailmaa, jopa syrjäiseen Suomeen, on ollut varsin nopeaa. Nervander sai kunnian tutustua valtavaan määrään sähkötekniikan historian suurmiehiä, eivätkä hänen omat saavutuksetaan olleet merkityksettömiä. Vaikka Nervanderia ei yleisesti tunneta tangentialvanometrin keksijänä, on hänen saavutuksena Maan magnetismin tutkimuksessa ainutlaatuisia.

Tangenttibussolin erikoisuus, sylinterimuotoiselle kehikolle käämitty kela, oli todellinen keksintö. Se aiheuttaa sisälleen lähes homogeenisen magneettikentän. Tämä mahdollisti pitkähkön magneettineulan käytön, jolloin laitteen herkkyyks oli suurempi kuin lyhyellä neulalla olisi saavutettu. Mutta kuinka Nervander päätyi tähän ideaan, jäi hämärän peittoon.

Tangenttibussolin rekonstruointikin onnistui. Laitteen rakentaminen oli suuri haaste, koska useisiin erilaisiin pieniin yksityiskohtiin tuli keksiiä ratkaisua. Materiaalivaatimukset johtivat lisätöihin. Esim. mistään kuvastosta ei löytynyt tarpeeksi pieniä sarakkeita, joissa ei olisi rautaa, terästä tai nikkeliä. Siispä sarakkeet oli tehtävä itse messingistä ja tinapronssista. Lopulta laitteesta tuli varsin hieno ja toimiva, vaikkakin jos nyt kaikella tällä tietotaidolla, joka työn aikana on kehittynyt, pitäisi rakentaa rekonstruktio uusiksi, tulisi laitteesta hieman erilainen.

Numeerisella analysilla saatiin arvioitua laitteen toimintaa tarkemmin. Näin saatiin laskettua virhe tangenttilakiin nähden sekä pystytään selittämään miksi tangenttilaki näyttää toimivan vain tiettyyn poikkeutuskulmaan saakka. Mittaukset todensivat laitteen toimivuuden sekä yhtyivät numeerisella analyysillä saatuihin ennusteisiin varsin hyvin, vaikka numeerisessa analyysissä oli paljon oletuksia sekä yksinkertaistuksia. Myös mittauksissa oli paljon

virhelähteitä.

Varsin monimutkaisen virtalangan aiheuttaman magneettikentän laskenta on lopulta varsin yksinkertaista. Ja magneettineulan poikkeutuskulman ennustaminen onnistuu varsin yksinkertaisella periaatteella. Laskukaavat ovat hieman monimutkaisen näköisiä, mutta käytännössä laskenta on yksinkertaista ja kohtuullisen nopeaa. Esim. liitteessä B esitetyttyjä kenttäkuvia varten magneettikenttä laskettiin noin neljässä miljoonassa pisteessä. Aikaa tähän kului n. 20 minuuttia.

Nervander kirjoitti tangenttibussolinsa toimivan oikein, eli tangenttilain mukaisesti, kun poikkeutuskulma on pienempi kuin 40 astetta. Numeerisen analyysin pohjalta voidaan sanoa, että käyttämällä hieman lyhyempää neulaa paranee tarkkuus. Käytännössä tangenttilakiin perustuvan laitteen käytännöllinen mittausalue ei ole rajoittamaton, sillä poikkeutuskulma saturoituu virran funktiona. Kun poikkeutuskulma on yli 45 astetta, alkaa dynamiikka kärsiä. Poikkeutuskulman maksimivirhe sattuu kun poikkeutuskulma on  $60 \leq \alpha \leq 75$  astetta. Sen sijaan poikkeutuskulman tangentin virhe kasvaa virran kasvaessa lähes lineaarisesti.

Mittaukset paljastivat tangenttibussolin käytännön ongelmat. Mittaaminen on todella hidasta. Magneettineulan värähtelyn asettumiseen voi mennä jopa viisi minuuttia. Jos mittalaitteen lähelle menee avaimet taskussa, voi olla varma, ettei suurinta mahdollista tarkkutta saavuteta. Nämä ongelmat tosin vaivasivat enemmän tai vähemmän kaikkia galvanometrejä. Nykyiset muuttaman kymmenen euron yleismittarit peittoavat kätevytydessään sekä tarkkuudessaan 1800-luvun alkupuoliskon hienoimmat ja kalleimmat galvanometrit, jotka olivat merkittäviä investointeja sen ajan tutkimuslaitoksille. Onko tangenttibussolilla mitään annettavaa nykypäivänä, vai joutaako se romukoppaan?

Sähkömagneetiikan peruslait eivät vanhene. Nykyaikaisten hienojen integroitua elektroniikkaa sisältävien sähkölaitteiden ymmärtäminen on vaikeaa ilman perusasioiden tuntemusta. Tekniikan opetuksessa ja opiskelussa olisi tärkeää *ymmärtää* meitä ympäröivää maailmaa. Jottei opiskelu jäisi pelkästään matemaattisten kaavojen pyörittelyksi ilman kykyä nähdä kaavojen taakse, tulisi opetuksessa käyttää myös käytännön esimerkkejä. Perusasioita taas on vaikea oppia monimutkaisten esimerkkien kautta. Tangenttibussolilla on sekä historiallista että opetuksellista arvoa. Se on yksinkertainen laite, jonka

kautta on helppo ymmärtää sähkövirran magneettivaikutus ja kuinka tätä voidaan yksinkertaisesti hyödyntää. Lisäksi siihen liittyvä taustahistoria valottaa käsitystä Suomen tieteen tilasta ja kehityksestä 1800-luvulla.

## A MATLAB-ohjelmien koodit

### A.1 Virtalangan magneettikenttä

```
function [Hx,Hy,Hz] = kelan_magneettikentta(X,Y,Z,lanka_alku,lanka_loppu);
% Ohjelma virtalangan magneettikentän laskemiseksi pisteissä X,Y,Z.
% Virtalanka määritellään suorten johdinpätkien alku- ja loppupisteinä.
%
% argumentit:
%     X,Y,Z : laskentapistet
%     lanka_alku : virtalangan alkupisteet
%     lanka_loppu : virtalangan loppupisteet
%
% Ulostulo:
%     Hx,Hy,Hz : Magneettikentän komponentit
%
% Kirjoitettu 8.11.2006
% Viimeksi päivitetty 12.2.2007
%
% Jukka Venermo / EMLAB / TKK

I = 1 ; % virta
Hx = 0*X; Hy = Hx; Hx = Hx; % taulokoiden alustus

for k = 1:size(lanka_alku,1)
    rv = [X(:) Y(:) Z(:)];
    p1 = ones(length(X(:)),1)*lanka_alku(k,:);
    p2 = ones(length(X(:)),1)*lanka_loppu(k,:);

    a = p2-p1; u = a./(sqrt(sum(a.^2,2))*[1 1 1]);
    a1 = rv-p1; u1 = a1./(sqrt(sum(a1.^2,2))*[1 1 1]);
    a2 = rv-p2; u2 = a2./(sqrt(sum(a2.^2,2))*[1 1 1]);

    rho = sqrt(sum(cross(u,a1).^2,2));
    kosini1 = sum(u.*u1,2);
    kosini2 = sum(u.*u2,2);
    u_fii = cross(u,u1); u_fii = u_fii./(sqrt(sum(u_fii.^2,2))*[1 1 1]);

    Hx = Hx(:) + u_fii(:,1).*I./4./pi./rho.*(kosini1-kosini2);
    Hy = Hy(:) + u_fii(:,2).*I./4./pi./rho.*(kosini1-kosini2);
    Hz = Hz(:) + u_fii(:,3).*I./4./pi./rho.*(kosini1-kosini2);
end

Hx = reshape(Hx,size(X));
Hy = reshape(Hy,size(X));
Hz = reshape(Hz,size(X));
```

## A.2 Virtalanka

```
function [lanka_alku, lanka_loppu] = virtalanka(kelaus,d)
% Ohjelma virtalangan alku- ja loppupisteiden luomiseen
%
%
% Argumentit:
%     kelaus : kelaustyyppi
%             'j' = rekonstruoidun bussolin virtalanka
%             'n' = Nervanderin alkuperäislanka
%             'p' = Poulletin virtasilmukka
%     d : siirros Helmholtzin kela varten (ei pakollinen)
%
% Ulostulo:
%     lanka_alku : virtalangan alkupisteet
%     lanka_loppu : virtalangan loppupisteet
%
% Kirjoitettu 8.11.2006
% Viimeksi päivitetty 12.2.2007
%
% Jukka Venermo / EMLAB / TKK

if nargin < 2
    d = 0;
end

if kelaus == 'p'
    al = linspace(0,pi*2,361);
    lanka_alku = [cos(al(1:end-1))', zeros(360,1)+d, sin(al(1:end-1))'];
    lanka_loppu = [cos(al(2:end))', zeros(360,1)+d, sin(al(2:end))'];

else
    if kelaus == 'j'
        h_to_d = 28/107;
        y_etu = [-47:2:47]/107*2; y_taka = [-46:2:46]/107*2;
        x_etu = sqrt(1-y_etu.^2); x_taka = sqrt(1-y_taka.^2);

    elseif kelaus == 'n'
        h_to_d = 23/70;
        y_etu = [-25:2:25]/70*2; y_taka = [-24:2:24]/70*2;
        x_etu = sqrt(1-y_etu.^2); x_taka = sqrt(1-y_taka.^2);
    end
    r = 1; h = 2*r*h_to_d;

    lanka_alku = [-x_etu(1) y_etu(1) -h/2];
    lanka_loppu = [-x_etu(1) y_etu(1) h/2];
end
```

```
for k = 1:length(y_etu)-1;
    lanka_alku = [lanka_alku;
                  -x_etu(k)  y_etu(k)  h/2;
                  x_etu(k)  y_etu(k)  h/2;
                  x_taka(k)  y_taka(k) -h/2;
                  -x_taka(k)  y_taka(k) -h/2];

    lanka_loppu = [lanka_loppu;
                   x_etu(k)  y_etu(k)  h/2;
                   x_taka(k)  y_taka(k) -h/2;
                   -x_taka(k)  y_taka(k) -h/2;
                   -x_etu(k+1) y_etu(k+1) h/2];
end

lanka_alku = [lanka_alku;
              -x_etu(end)  y_etu(end)  h/2;
              x_etu(end)  y_etu(end)  h/2];

lanka_loppu = [lanka_loppu;
               x_etu(end)  y_etu(end)  h/2;
               x_etu(end)  y_etu(end) -h/2];
end
```



### A.3 Magneettineulan poikkeutuskulma

```
function [Ilin,Ilog,alfalin,alfalog] = poikkeutuskulma(Hx,Hy,tark)
% Ohjelma jolla lasketaan magneettineulan poikkeutuskulma
% virran funktiona neulan suht. pituuksilla [0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.8]
%
% Argumentit:
%     Hx, Hy : Magneettikentän vaakakomponentit (fii:n ja rho:n
%             funktioina (33 x N_fii)-taulukossa). rho = [0:0.025:0.8]
%     tark : Virran arvojen tiheys
%
% Ulostulo:
%     Ilin, Ilog : Virran arvot lineaarisesti ja logaritmisesti
%     alfalin : poikkeutuskulmat Ilin:in funktiona
%     alfalog : poikkeutuskulmat Ilog:in funktiona
%
% Kirjoitettu 4.12.2006
% Viimeksi päivitetty 12.2.2007
% Jukka Venermo / EMLAB / TKK

% neulan dipolimomentti (vakio)
M = 1;

Ilin = linspace(0,3,tark);
Ilog = logspace(-3,3,tark);

alfalin = [];
alfalog = [];

%%-----%%
% NUMEERINEN INTEGROINTI %
%%-----%%

H1x = sum(Hx(1:5,:))/5;
H2x = sum(Hx(1:9,:))/9;
H3x = sum(Hx(1:13,:))/13;
H4x = sum(Hx(1:17,:))/17;
H5x = sum(Hx(1:21,:))/21;
H8x = sum(Hx(1:33,:))/33;

H1y = sum(Hy(1:5,:))/5;
H2y = sum(Hy(1:9,:))/9;
H3y = sum(Hy(1:13,:))/13;
H4y = sum(Hy(1:17,:))/17;
H5y = sum(Hy(1:21,:))/21;
H8y = sum(Hy(1:33,:))/33;
```

```

H0 = sqrt(Hx(1).^2+Hy(1).^2);
alpha0 = atan2(Hy(1),Hx(1))-pi/2; % offset

fii = linspace(0,2*pi,length(Hx));

m = M*[cos(fii+alpha0);sin(fii+alpha0)]; % dipolimomenttivektori

for ii = 1:tark

    H1lin = [Ilin(ii)*H1x/H0 + cos(alpha0); Ilin(ii)*H1y/H0 + sin(alpha0)];
    H1log = [Ilog(ii)*H1x/H0 + cos(alpha0); Ilog(ii)*H1y/H0 + sin(alpha0)];
    H2lin = [Ilin(ii)*H2x/H0 + cos(alpha0); Ilin(ii)*H2y/H0 + sin(alpha0)];
    H2log = [Ilog(ii)*H2x/H0 + cos(alpha0); Ilog(ii)*H2y/H0 + sin(alpha0)];
    H3lin = [Ilin(ii)*H3x/H0 + cos(alpha0); Ilin(ii)*H3y/H0 + sin(alpha0)];
    H3log = [Ilog(ii)*H3x/H0 + cos(alpha0); Ilog(ii)*H3y/H0 + sin(alpha0)];
    H4lin = [Ilin(ii)*H4x/H0 + cos(alpha0); Ilin(ii)*H4y/H0 + sin(alpha0)];
    H4log = [Ilog(ii)*H4x/H0 + cos(alpha0); Ilog(ii)*H4y/H0 + sin(alpha0)];
    H5lin = [Ilin(ii)*H5x/H0 + cos(alpha0); Ilin(ii)*H5y/H0 + sin(alpha0)];
    H5log = [Ilog(ii)*H5x/H0 + cos(alpha0); Ilog(ii)*H5y/H0 + sin(alpha0)];
    H8lin = [Ilin(ii)*H8x/H0 + cos(alpha0); Ilin(ii)*H8y/H0 + sin(alpha0)];
    H8log = [Ilog(ii)*H8x/H0 + cos(alpha0); Ilog(ii)*H8y/H0 + sin(alpha0)];

%%-----%%
% ENERGIAN MINIMOINTI %
%%-----%%

[a, I1lin] = min(-dot(H1lin,m));
[a, I1log] = min(-dot(H1log,m));
[a, I2lin] = min(-dot(H2lin,m));
[a, I2log] = min(-dot(H2log,m));
[a, I3lin] = min(-dot(H3lin,m));
[a, I3log] = min(-dot(H3log,m));
[a, I4lin] = min(-dot(H4lin,m));
[a, I4log] = min(-dot(H4log,m));
[a, I5lin] = min(-dot(H5lin,m));
[a, I5log] = min(-dot(H5log,m));
[a, I8lin] = min(-dot(H8lin,m));
[a, I8log] = min(-dot(H8log,m));

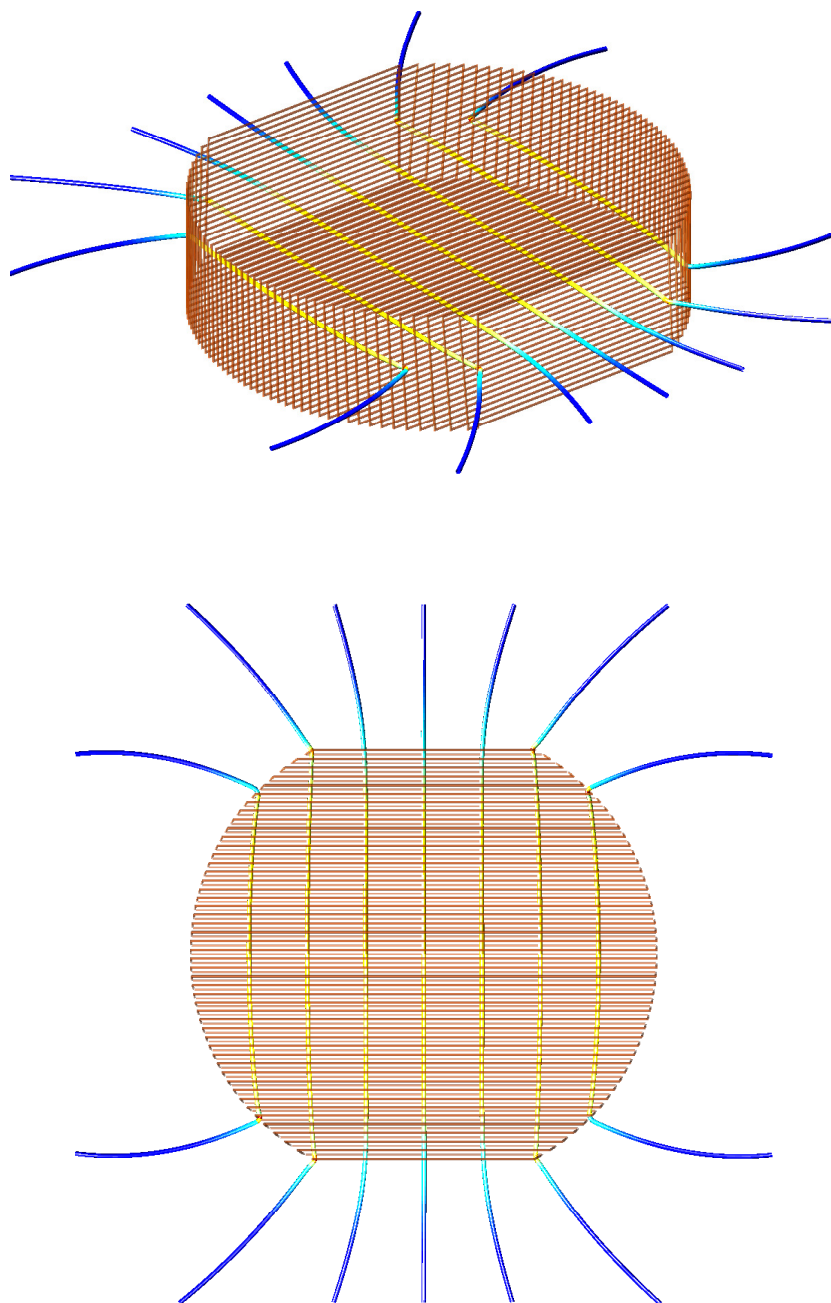
alfalin = [alfalin [fii(I1lin) fii(I2lin) fii(I3lin)...
                  fii(I4lin) fii(I5lin) fii(I8lin)]];
alfalog = [alfalog [fii(I1log) fii(I2log) fii(I3log)...
                   fii(I4log) fii(I5log) fii(I8log)]];
end

```

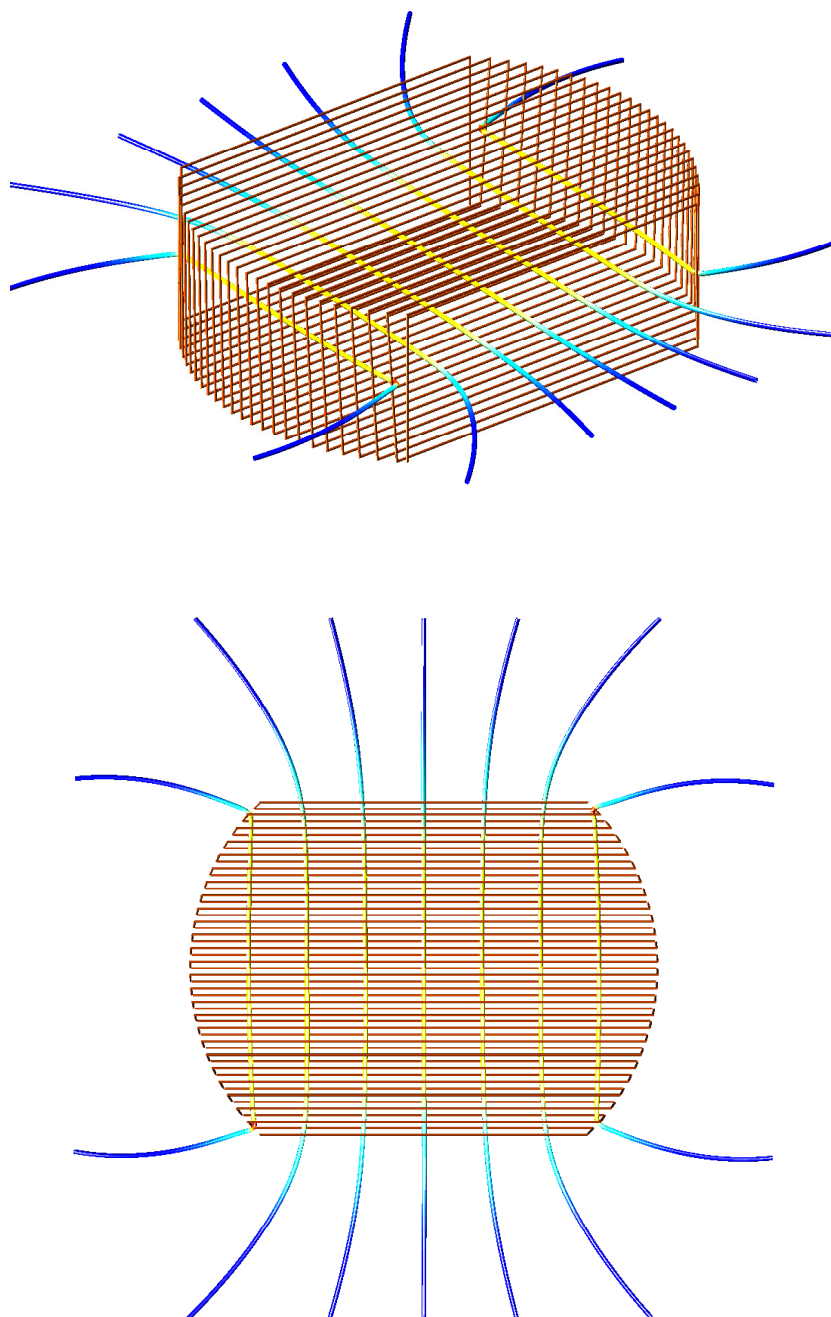
## **B Kenttäjakaumakuvia**

Tässä liitteessä on kuvattuna rekonstruoidun tangenttibussolin, Nervanderin alkuperäiskirjoitukseen [12] perustuvan tangenttibussolin, Pouilletin tangenttigalvanometrin sekä Helmholtzin tangenttigalvanometrin virtojen aiheuttamien magneettikenttäjakaumien poikittauskomponentit magneettineulan tasossa.

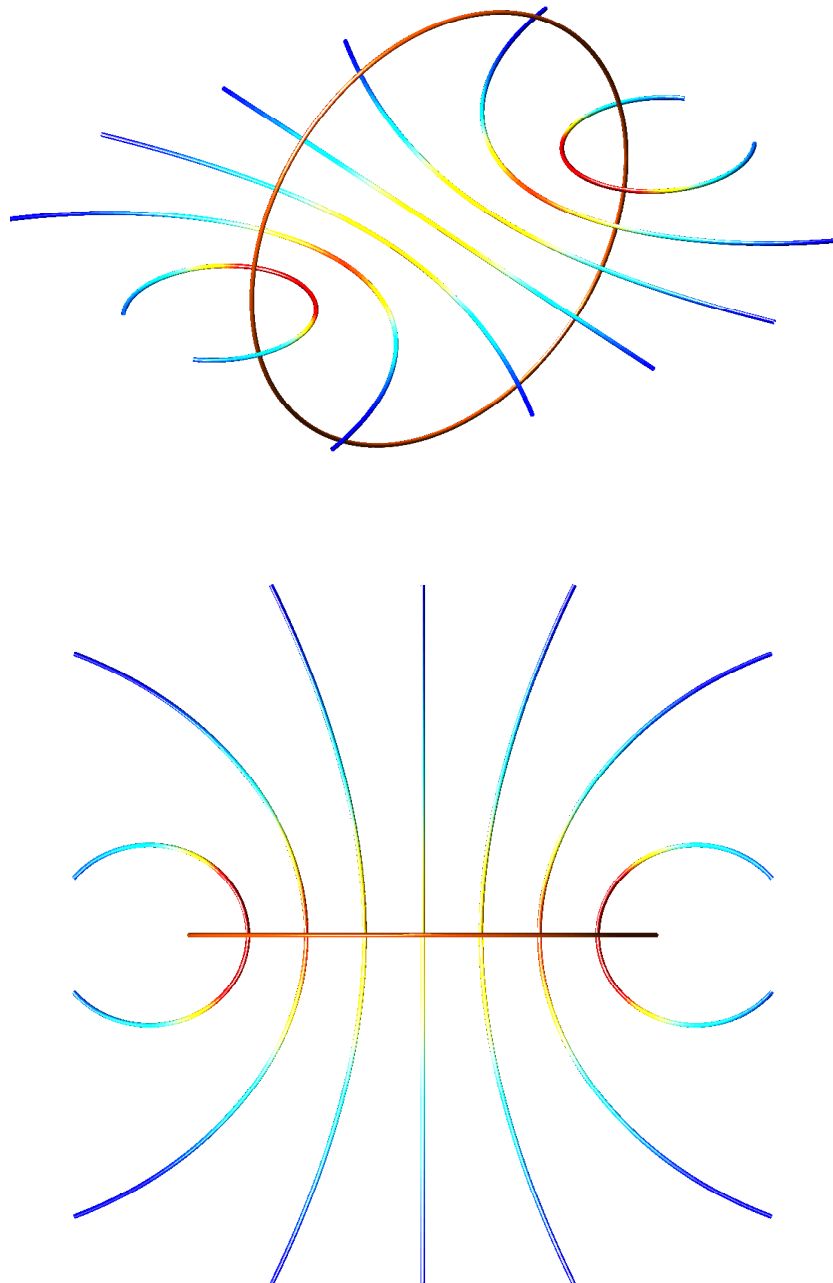
Kuvissa on piirrettynä magneettikentän vuoviivat, joiden värit kertovat kentän voimakkuuden (sininen–heikko kenttä, punainen–voimakas kenttä). Kaikkien rakenteiden kentänvoimakkuus on suhteutettu siten, että keskipisteessä kaikilla on yhtä voimakas kenttä. Kuviin on myös piirretty virtalanka, joka kentän aiheuttaa.



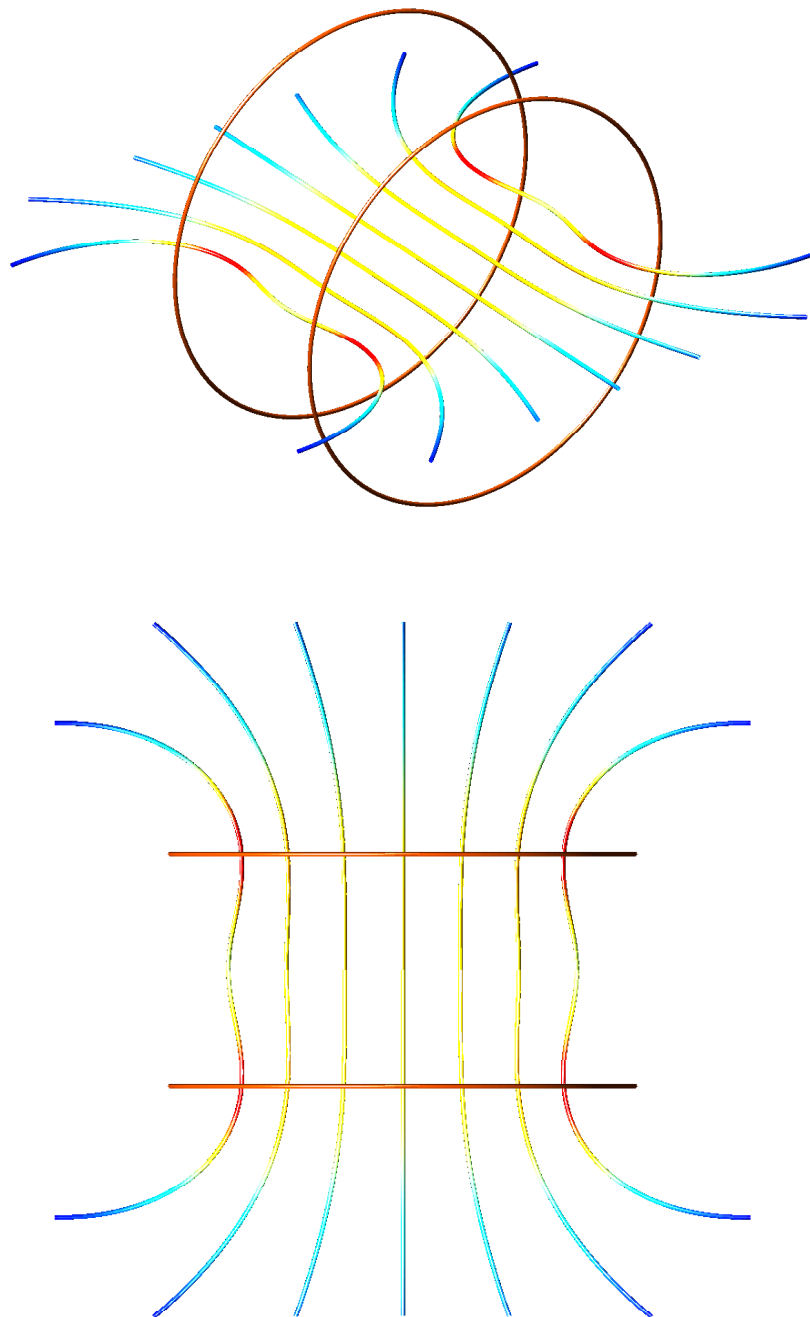
Kuva 34: Rekonstruoitu tangenttibussoli.



Kuva 35: Nervanderin tangentialbussoli.



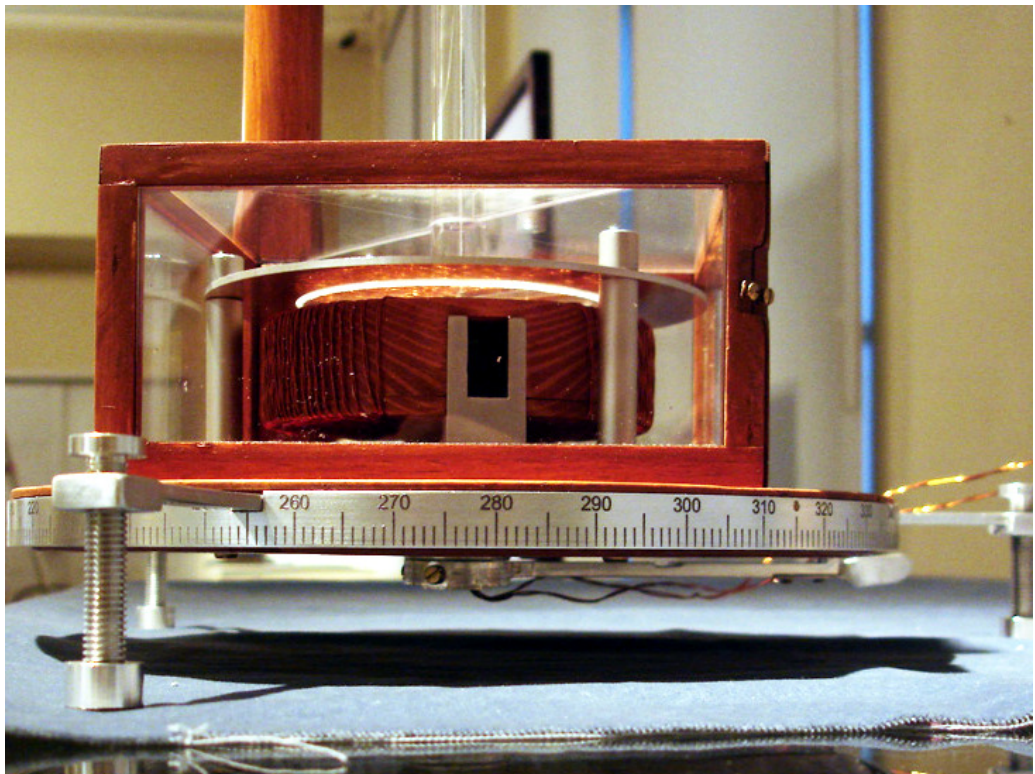
Kuva 36: Pouilletin tangentialgalvanometri.



Kuva 37: Helmholtzin tangentigalvanometri.

## C Kuvia tangenttibussolin rekonstruoinnista

Tässä liitteessä on esitettyä kuvia tangenttibussolin rakennusprojektin eri vaiheista. Rakentaessa tuli vastaan useita käytännön kysymyksiä, joihin ei ollut valmiita vastauksia. Materiaalivaatimuksista johtuen valmiita osia ei voitu käyttää muutamaa messinkiruuvia lukuunottamatta. Tärkeimmät työkalut ovat olleet pylväspora, jyrsintäpora, metallisorvi, vannesaha sekä kierretapit ja -pakat.

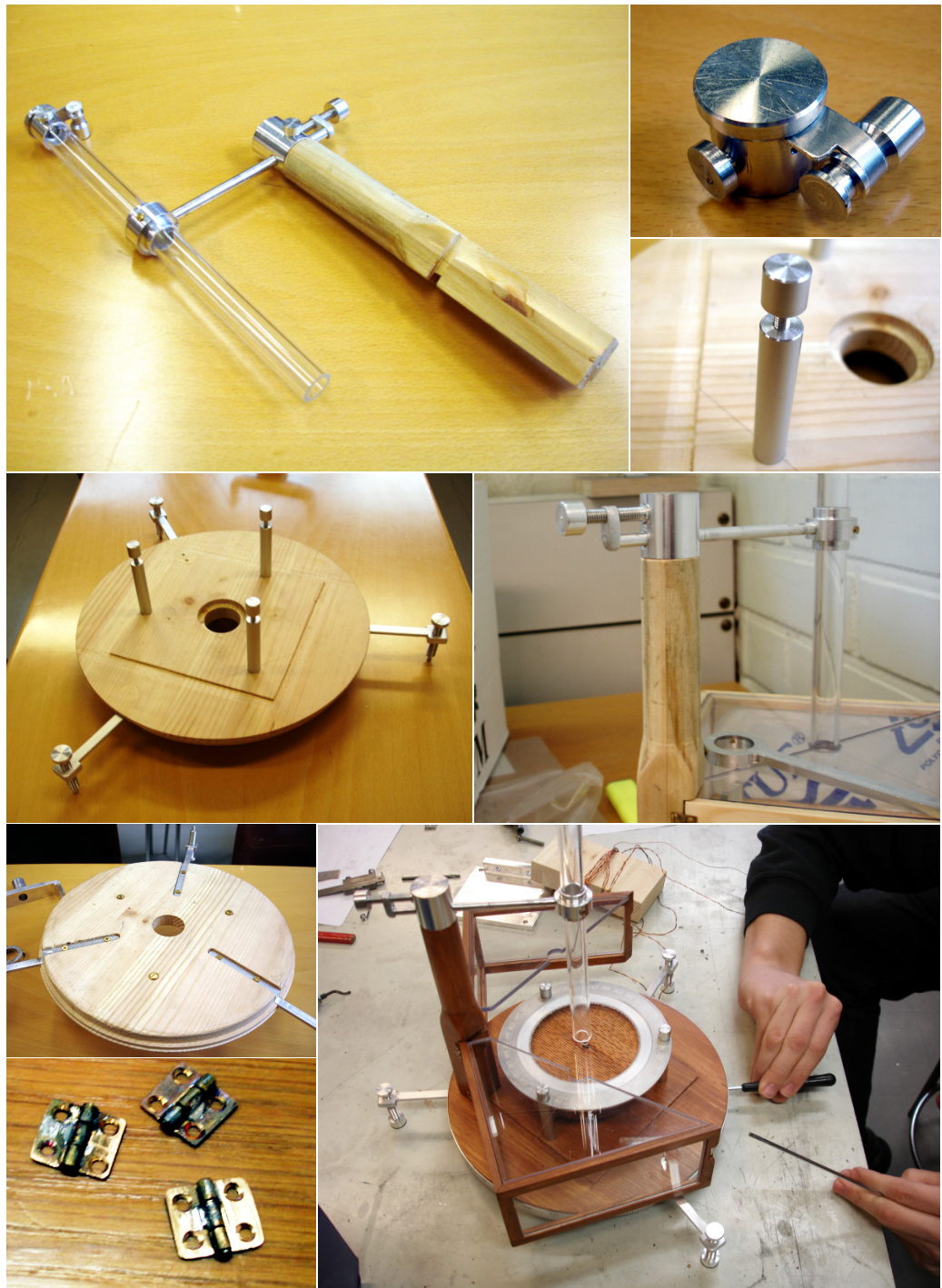


Kuva 38: Tangenttibussoli.





Kuva 39: Sylinterikelan työvaiheita.



Kuva 40: Tangenttibussolin jalusta.





Kuva 41: Tangenttibussolin mitta-asteikot.





Kuva 42: Alumiinin työstöä.

## Viitteet

- [1] Ismo Lindell: *Sähkötekniikan historia*, Otatieto 1994.
- [2] Ismo Lindell: *Sähkötekniikan historia, luennot 2006*. Sähkömagneetiikan laboratorion julkaisuja, raportti 25, tammikuu 2007.
- [3] *The History of Science and Technology: a Narrative Chronology*, Volume 1, Facts On Files, 1988, New York.
- [4] S. Thompson: *On the Magnet*, englanninkielinen käännös William Gilbertin teoksesta *De Magnete* vuodelta 1900. Vapaasti luettavissa Antique Booksin digitaalisesta kirjastosta <http://www.antiquebooks.net/readpage.html\#gilbert>
- [5] O. I. Franksen: *H. C. Ørsted - a man of two cultures*, Bang & Olufsen 1981.
- [6] *Kaisaniemestä Kumpulaan. Tutkimusta, havaintoja ja ihmisiä Ilmatieteen laitoksessa*, toimittanut H. Nevanlinna, Yliopistopaino, 2005.
- [7] P. Holmberg, H. Nevanlinna: *Geomagnetism in Finland: the lasting legacy of Johan Jakob Nervander*, Europhysics News vol.36/6, May/June 2005.
- [8] J. Keränen: *Johan Jakob Nervander tiedemiehenä*, Arkhimedes No1, 1955.
- [9] T. Vierros: *Puhuva kivi*. Kirjayhtymä 1994.
- [10] A. Niemi, A. Sihvola: *Herätteitä sähkömagnetismin tutkimukseen - J.J. Nervanderin dosentinväitöskirja vuodelta 1829 Keisarillisessa Aleksanterin-Yliopistossa*. Sähkömagneetiikan laboratorion julkaisuja, raportti 24, joulukuu 2006.
- [11] J.-F. Demonferrand: *Manuel d'électricité dynamique*, Bachelier éd. Paris, 1823.
- [12] J. J. Nervander: *Mémoire sur un Galvanomètre à châssis cylindrique par lequel on obtient immédiatement et sans calcul la mesure de l'intensité du courant électrique qui produit la déviation de l'aiguille aimantée*, Annales de Chimie et de Physique, Tome 55, 156-184 (1834).

- [13] A. Sihvola: *Johan Jakob Nervanderin tangenttibussolitutkielma vuodelta 1834*. Sähkömagnetiikan laboratorion julkaisuja, raportti 23, elokuu 2005.
- [14] Ilmatieteen laitos <http://www.fmi.fi/>  
Laitoksen historiaa <http://www.fmi.fi/organisaatio/historia.html>
- [15] Robert A. Paselkin tieteellisten instrumenttien museon verkkojulkaisu  
<http://humboldt.edu/~scimus/HSTC.27-35/Descriptions/TanGalv.htm>
- [16] Thomas B. Greensladen sivusto historiallisista tieteellisistä mittalaitteista [http://physics.kenyon.edu/EarlyApparatus/Electrical\\_Measurements/Tangent\\_Galvanometer/Tangent\\_Galvanometer.html](http://physics.kenyon.edu/EarlyApparatus/Electrical_Measurements/Tangent_Galvanometer/Tangent_Galvanometer.html)
- [17] Classic Encyclopedia, sähköinen tietosanakirja  
<http://www.1911encyclopedia.org/Electricity>
- [18] I. Lindell, A. Sihvola: *Sähkömagneettinen kenttäteoria 1. Staattiset kentät*, Otatieto 1995.
- [19] Wikipedia, sähköinen tietosanakirja  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Vernier\\_scale](http://en.wikipedia.org/wiki/Vernier_scale)
- [20] COMSOL Multiphysics™ <http://www.comsol.com/>
- [21] R. S. Whipple: *The Evolution of the Galvanometer*, Journal of Scientific Instruments, Vol XI, February, 1934, No. 2.